MUNDO CIENTIFICO

LA RECHERCHE

Nº 169 • Junio 1996 • 675 Ptas.

Dossier:
El futuro incierto del Ariane 5
El satélite español UPM-Sat 1

Chernóbil: balance y conclusiones

Los genes de la metamorfosis

La aspirina y los nuevos antiinflamatorios

NUEVA VISIÓN DEL ORIGEN DEL HOMBRE



SUMARIO Nº 169, JUNIO 1996



545. El nacimiento de Ariane 5. *¿El nuevo lanzador europeo se impondrá de manera tan brillante como el Ariane 4? A pesar de sus prudentes elecciones técnicas, su precio hace temer lo peor.*

CINCO MACROEVOLUCIONES

526. Nueva visión sobre el origen del hombre. *¿Ha influido el clima en la aparición de la bipedia? La evolución se considera actualmente como un fenómeno adaptativo.*

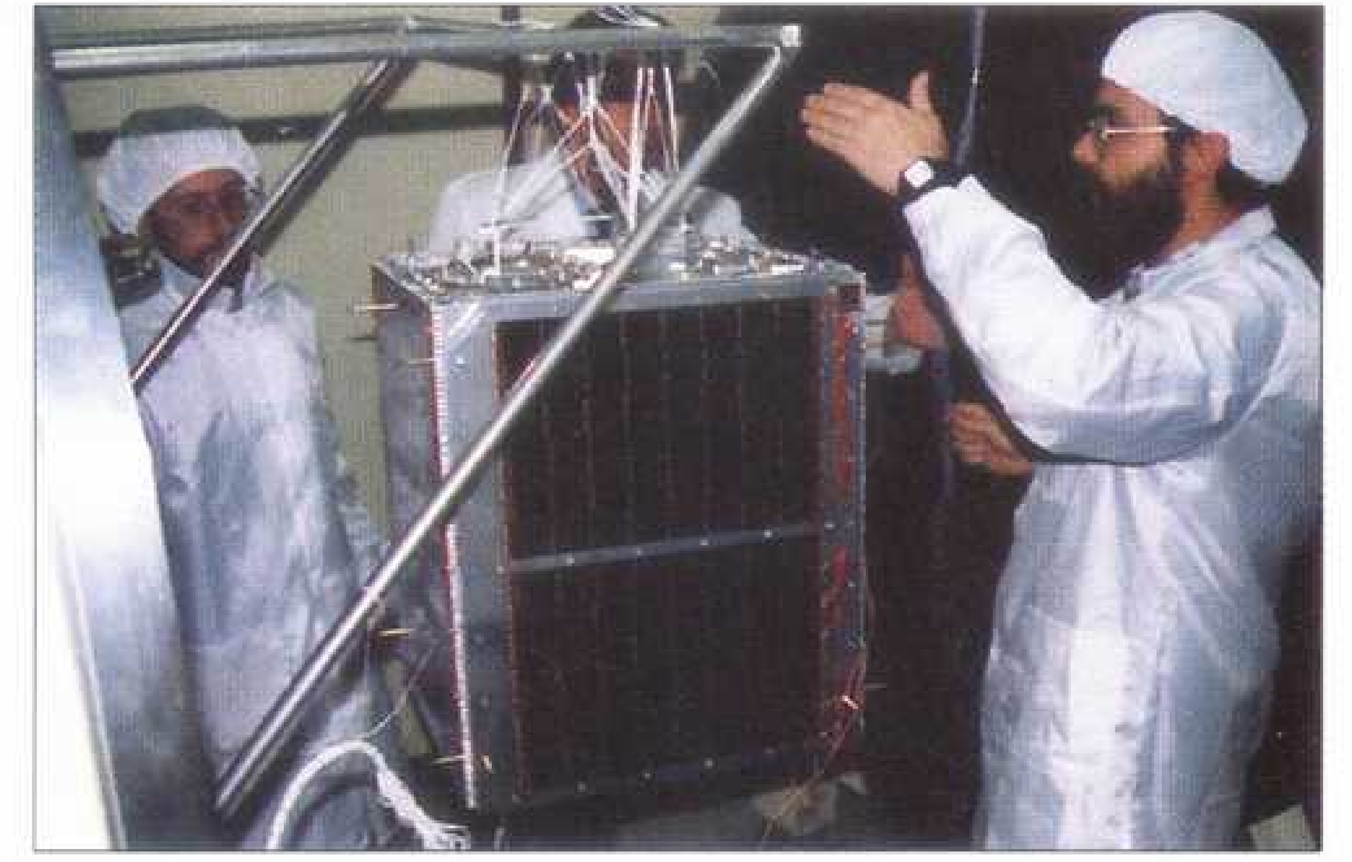


538. Los genes de la metamorfosis. *Los receptores de la hormona que desencadenan la metamorfosis de los batracios controlan la actividad de una verdadera orquesta de genes.*



588. Convocatorias y becas. *Dedicada a la información de todo aquello concerniente a convocatorias y becas, acompañada de direcciones de interés.*

SUMARIO



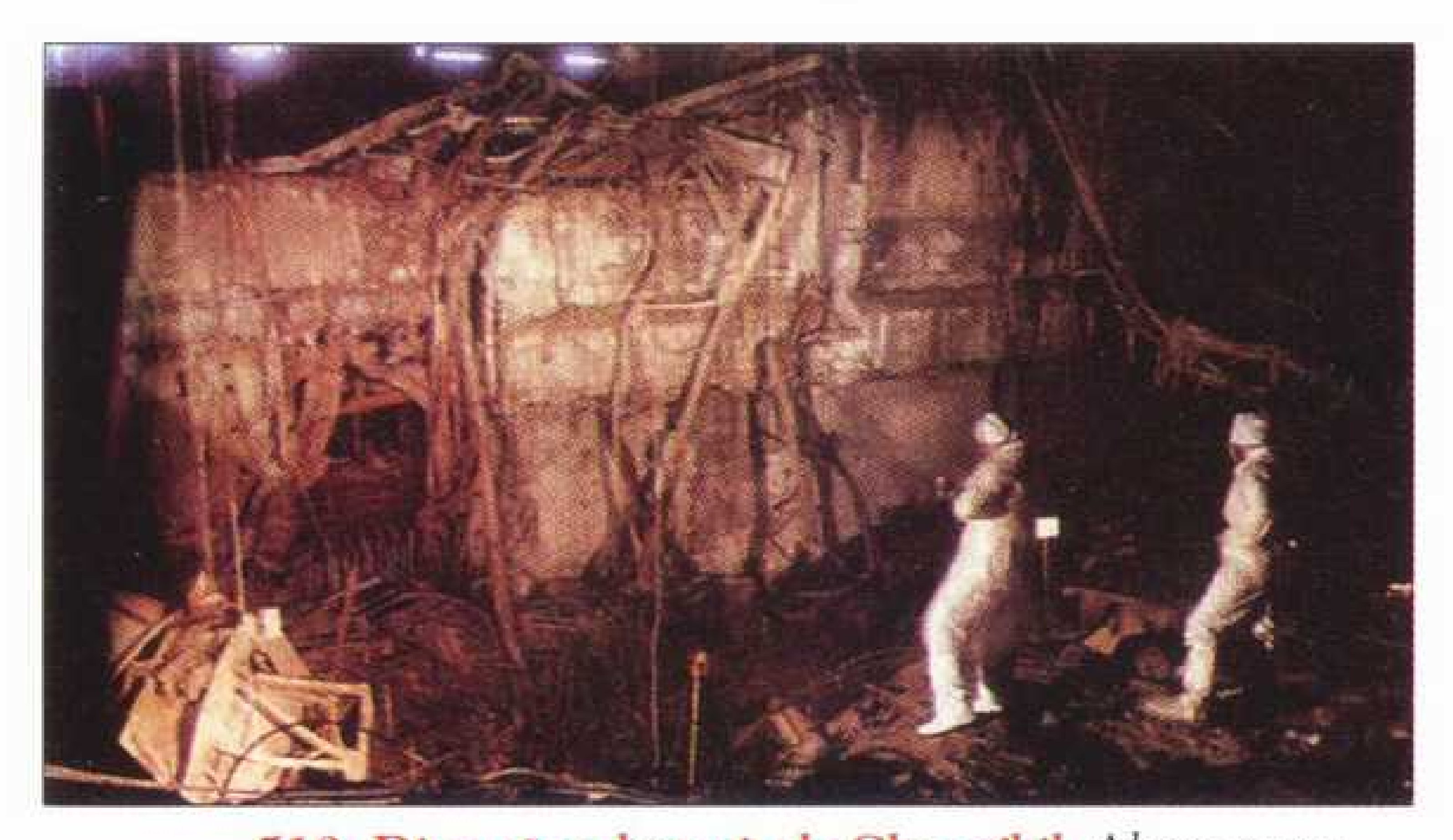
560. El satélite español UPM-Sat 1. En 1995 se puso en órbita el pequeño satélite español UPM-Sat 1, diseñado y construido por profesores y alumnos de la Universidad Politécnica de Madrid.



572. René Descartes, sabio y filósofo. Nacido hace 400 años, René Descartes produjo una obra científica ambiciosa y contrastada. El eco de su intento aún perdura en el tiempo.



501. Ciencia y sociedad. Teléfonos, «matadores de sueños».



510. Diez años después de Chernóbil. Ahora ya se puede medir el impacto del mayor accidente nuclear de la historia: sin duda el más grave. Efecto marginal: el lugar suscita una sorprendente investigación biológica.

¿QUÉ ES LA VIDA?

Se ha inaugurado en el Museo de la Ciencia de la Fundación "la Caixa", de Barcelona, la exposición *¿Qué es la vida? El sistema inmunitario contra el sida.*
La duración prevista es de un año. El visitante que se interese por esta exposición podrá viajar, a través de un vídeo interactivo y de representaciones reales a escala 1/3.000.000, desde una visión general del planeta Tierra hasta el virus de inmunodeficiencia humana (VIH), pasando por el interior de un capilar sanguíneo aumentado 30.000 veces. Éste es uno de los elementos más espectaculares que conforman la exposición, que desea que el visitante comprenda, antes que nada, el funcionamiento del VIH sobre el cuerpo y los mecanismos de ésta para defenderse del mortal intruso. La tesis que la muestra defiende es que, después de entender esto, el visitante vea la prevención contra el sida como una necesidad.
Esta exposición se inscribe dentro de las actividades de la Fundación "la Caixa" en los ámbitos de prevención, investigación y atención al enfermo de sida. La Fundación ha creado un programa de prevención dirigida a los alumnos de enseñanza secundaria de todo el Estado y de Andorra (*«Sida. Saber ayuda»*), colabora con el laboratorio de Retrovirología del Hospital Germans Trias i Pujol e impulsa el programa de «Hospitalización a domicilio para los enfermos de sida» juntamente con el Hospital Clínico de Barcelona y la Consejería de Sanidad y Seguridad Social de la Generalidad de Cataluña.
Para más información: Museo de la Ciencia. Teodoro Roviralta 55. 08022 Barcelona.
Tel. (93) 212 60 50.
Fax (93) 417 03 81.



¿Se controlan algunas infecciones virales?

Ni la gripe, ni el cáncer, ni el sida tienen remedio definitivo a corto o medio plazo. Frente a los alegres augurios de algunos científicos, el profesor José Prieto, catedrático de Microbiología de la Universidad Complutense y jefe del Servicio de esta especialidad en el Hospital Clínico de Madrid, prefiere opinar con los pies anclados en la realidad: *«Todos los vaticinios más optimistas han ido fallando y muchos de los enfoques aplicados hasta ahora han sido decepcionantes. Ello va a exigir que los investigadores agudicen el ingenio en busca de nuevas vías sobre la base de un mejor conocimiento de los mecanismos íntimos por los que se rigen los virus.»*.
La virología es todavía la «gran desconocida», incluso en el ámbito de la profesión médica. *«El sanitario que terminó su carrera hace más de cinco años tiene grandes lagunas en su formación sobre virología»*, dice el profesor Prieto, que ha puesto en marcha un curso práctico de infecciones virales para formación continuada del médico de cabecera,* con el patrocinio del Grupo Synthelabo-Alonga.
El objetivo final de esta iniciativa es ayudar al médico de cabecera a distinguir mejor las infecciones virales de las bacterianas y de este modo ayudarle a la prescripción de la terapia más adecuada.

* *Para más información* sobre este curso pueden dirigirse al Laboratorio Synthelab-Alonga, Sr. Santiago López. C/Alcalá 434-436. 28027 Madrid.
Tel. (91) 393 80 00.
Fax (91) 393 80 50.

Luchar contra una plaga emergente: la criptosporidiosis

Resistentes a la cloración del agua destinada a la bebida, los criptosporidios (*Cryptosporidium parvum*), unos parásitos unicelulares, provocan diarreas y una desnutrición que pueden ser mortales en los niños inmunodeprimidos y los adultos infectados por el HIV. Aunque el primer caso no se descubrió hasta 1976, la criptosporidiosis ya es un problema importante de salud pública en Estados Unidos y en los países en desarrollo, donde provoca el 2 y el 6 % de las diarreas graves respectivamente (ASM *News*, *62*, 14, 1996). Pero investigadores del departamento de Agricultura de Estados Unidos acaban de descubrir el papel protector de la interleuquina 12 (IL-12), un mediador del sistema inmunitario, contra el parásito (J.S. Urban *et al.*, *J. Immunol.* 156, 263, 1996). Un papel protector que ya se había establecido respecto a otros parásitos unicelulares, como la leishmania, el toxoplasmo y un plasmodio (H.W. Murray *et al.*, *J. Exp. Med.*, *181*, 387, 1995; M.M. Stevenson *et al.*, *J. Immunol.*, *155*, 2545, 1995). De ahí la esperanza que un uso adecuado de la IL-12 en los primeros días de la infección pueda mejorar los tratamientos actuales, poco eficaces en el hombre y en los animales de cría.

PEQUEÑOS SATÉLITES: MISIONES Y TECNOLOGÍA



Los pequeños satélites son el vehículo adecuado para muchas misiones espaciales por las ventajas de su bajo coste y corto tiempo de desarrollo. Estos satélites hacen posible que incluso países con pequeños presupuestos de investigación y con poca o ninguna experiencia en tecnología espacial puedan afrontar la participación en su desarrollo, lanzamiento y operación. Los satélites pequeños presentan además la oportunidad de formar a estudiantes, ingenieros y científicos en diversas disciplinas.
El objetivo principal de la Conferencia es ofrecer una oportunidad de encuentro a la comunidad internacional de científicos, ingenieros, que permita analizar el estado del arte de la tecnología dedicada a los pequeños satélites, sus posibilidades de contribuir al desarrollo regional y promover nuevos programas de colaboración.
La Conferencia está organizada conjuntamente por Naciones Unidas (ONU) y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Tendrá lugar en Madrid durante la semana del 9 al 13 de septiembre de 1996.
***Para más información*: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Subdirección de Cooperación Científica y Tecnológica. C/ Carretera de Ajalvir, km 4. 28050 Torrejón de Ardoz. Madrid. Tel. (341) 520 16 96/520 17 72. Fax (341) 520 19 39/520 13 72.**

EXPOSICIÓN ITINERANTE SOBRE BETANCOURT

Ingeniero español de la Ilustración

La exposición itinerante por varias capitales españolas y Rusia, *Betancourt y los inicios de la ingeniería moderna en Europa*, presentada en el Pabellón Villanueva del Real Jardín Botánico de Madrid (CSIC) rescata del olvido, no de unos pocos admiradores fieles pero sí de una inmensa mayoría, la vida y obra de este ingeniero español de la Ilustración nacido en las Islas Canarias en 1758 y que falleció en San Petersburgo en 1824.



Tres áreas expositivas

«Se ha dividido la exposición —afirma Ignacio González Tascón, responsable de la Comisaría Científica y del Proyecto Expositivo— *en tres grandes áreas, las dos primeras dedicadas al periodo en que Betancourt estuvo al servicio de la Corona española, y la tercera a su intensísima etapa rusa»*.

En la primera se aborda desde sus primeros trabajos técnicos, los informes sobre las minas de Almadén o sobre el Canal Imperial de Aragón, hasta sus trabajos en campos tan variados como la aerostación, el hilado mecánico, la fundición de cañones o el diseño —en colaboración con el gran relojero Breguer— de un novedoso telégrafo óptico de gran interés.

El área segunda está dedicada al Real Gabinete de Máquinas, la extraordinaria colección de diseños, maquetas, modelos y memorias científicas que Agustín de Betancourt y sus colaboradores lograron reunir con el apoyo del gran político ilustrado Floridablanca. En el Real Gabinete se atesoraron las últimas innovaciones de Perronet en la construcción de puentes, las más modernas técnicas de minería y metalurgia —aportación de Juan López de Peñalver, alma del Gabinete— y los descubrimientos realizados por Betancourt en Inglaterra, donde actuó como espía industrial al servicio de la Corona española.

El Real Gabinete de Máquinas, cuyas colecciones se instalaron inicialmente en el Palacio del Buen Retiro, fue primer gran museo de tecnología que tuvo Madrid en su historia. Hoy hemos podido recrear una pequeña parte de aquella deslumbrante



colección, dispersa por las guerras y la incuria de los hombres.

El tercer bloque temático está consagrado a los años fecundos de Betancourt en Rusia, desde su voluntario exilio en 1808 hasta su muerte en 1824. Comprende los años de madurez de un gran ingeniero y hombre de acción. Betancourt organiza las comunicaciones fluviales, básicas

RECONSTRUCCIÓN DEL CLIMA DEL PASADO

Investigadores españoles estudian el clima del pasado para conocer mejor el clima natural de la Tierra.

El Plan Nacional de Investigación y el Desarrollo (I+D) financia cuatro proyectos de investigación mediante los que se reconstruirá el clima del pasado, cuyo conocimiento es fundamental para entender mejor el clima natural de la Tierra y, por tanto, el calentamiento global del planeta.

Uno de los principales retos de la investigación del clima de la Tierra de cara al siglo XXI es detectar de qué manera contribuye la intensificación del efecto invernadero al calentamiento global del planeta. Dicho calentamiento no puede ser atribuido, en su totalidad, a un incremento de los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera, consecuencia de la actividad humana, ya que se trata de un efecto superpuesto a lo que se podría llamar clima natural del planeta, que no es del todo conocido.

El conocimiento del clima del pasado para conocer mejor el clima natural de la Tierra está específicamente recogida en uno de los programas del Plan Nacional de I+D, el Programa Nacional de I+D sobre el Clima (PIC). En los últimos mil años se ha pasado de una etapa de temperaturas superiores a las actuales, durante el medioevo, a la llamada Pequeña Edad de Hielo que finalizó durante el siglo pasado y de la que, desde entonces, nos estaríamos recuperando. No se tiene la seguridad de que estos periodos se dieran en todo el planeta y, desde luego, no se tiene todavía un conocimiento adecuado de lo que ocurrió en nuestra área geográfica.

Tiene gran interés el conocimiento durante el Holoceno (5000 o 6000 años antes del presente), pues se piensa que durante el siglo próximo se podrían dar condiciones semejantes a las de entonces, con lo que sería posible, por analogía, tener información acerca de cuál podría ser el clima del planeta en el futuro. Algo semejante aplicaría en relación con otros periodos cálidos más lejanos en el tiempo (durante el Pleistoceno y el Plioceno).

Es posible, mediante modelos numéricos, simular el clima. Partiendo, para una época dada, de las características de emisión de energía por el Sol, del movimiento de la Tierra en torno a él y de la localización de los continentes sobre el planeta, se pueden llevar a cabo experimentos, por medio de potentes ordenadores, para reproducir el clima en épocas pretéritas. Para la verificación de los resultados se necesita la comparación con la realidad; esa realidad únicamente la puede proporcionar la investigación paleoclimática.

De los cuatro proyectos financiados por el PIC, dos de ellos proponen reconstruir el clima durante el último milenio mediante dos metodologías diferentes. En el primero, a cargo del Centro de Ciencias Ambientales de Madrid (CSIC), se llevará a cabo una reconstrucción del registro de inundaciones de gran magnitud en la cuenca del Tajo con el fin de poder conocer las variaciones climáticas en el periodo de estudio y analizar los riesgos naturales, en concreto de inundación, consecuencia de condiciones climáticas cambiantes. El segundo —coordinado entre las Universidades de Granada y Barcelona— pretende llevar a cabo un estudio de la variabilidad climática en la Península Ibérica desde el siglo XVI hasta nuestros días. Para ello se recurrirá a información histórica localizable, a lo largo y ancho de toda España, en archivos, bibliotecas, anales urbanos correspondencia, etc. Y, cuando los haya, se emplearán registros instrumentales.

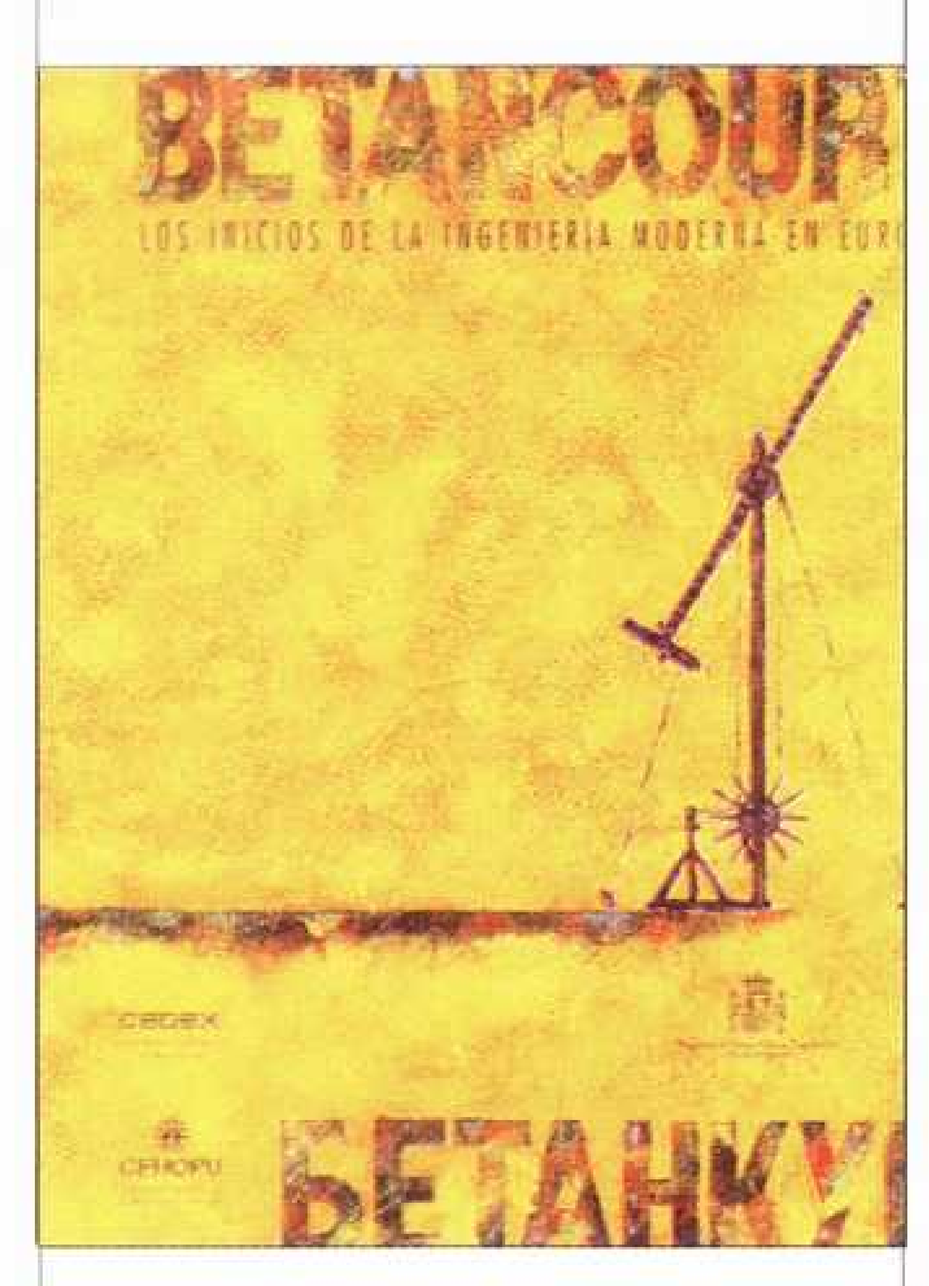
Otro proyecto, a desarrollar en la Universidad de Alicante, propone llevar a cabo una reconstrucción paleoclimática del Holoceno, en las cuencas de los ríos Guadiana (Alto) y Júcar, así como la evolución climática hasta nuestros días. Para ello analizarán las formaciones tobáceas de las cuencas indicadas. Un último proyecto, coordinado entre el Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera de Barcelona (CSIC) y la Universidad de Valencia, tiene por finalidad la reconstrucción climática desde nuestros días hacia el pasado a partir de sedimentos lacustres ya que su formación está determinada por las condiciones ambientales. Mediante el estudio del contenido de los sedimentos se puede llegar a deducir la precipitación y temperatura en el momento de la sedimentación, lo que permite extender a épocas anteriores el conocimiento del clima.

La consecución de los objetivos planteados por los investigadores implicados en dichos proyectos permitirá a PIC empezar a responder a la cuestión abierta sobre la variabilidad climática natural en nuestra área geográfica durante el pasado.

para el desarrollo de Rusia, funda el Instituto del Vías de Comunicación a semejanza de la Escuela de Caminos y Canales de Madrid, diseña los primeros puentes modernos de Rusia, reforma factorías que se habían quedado anticuadas —como la fábrica de cañones de Tula— proyecta dragas, impulsa y propicia los primeros pasos de la navegación fluvial a vapor. Los conocimientos adquiridos en Francia e Inglaterra le permiten asimismo construir una moderna fábrica de papel moneda en San Petersburgo, proyectando también una factoría en Varsovia para acuñar moneda mecánicamente, utilizando la fuerza del vapor.
Por otro lado, su legendaria habilidad técnica le lleva a diseñar el primer siderómetro, básico para ensayar la resistencia de las cadenas que se emplean en los primeros puentes colgantes rusos, así como grúas, andamiajes, cabrestantes y otras técnicas constructivas necesarias para levantar la gran columna de Alejandro I de la catedral de San Isaac, ambas en San Petersburgo; pero también a realizar en un tiempo mínimo la gran cerca de madera para el picadero de Moscú.
Nos queda tan sólo señalar su labor como urbanista y planificador, puesta de relieve en su creación más querida, la gran feria comercial levantada en Nizhni Nóvgorod, en la confluencia de los ríos Oka y Volga, de enorme importancia para asegurar el abastecimiento de mercancías a una gran parte de Rusia.

Un catálogo ilustrado

Acompañando a la cuidada exposición un no menos cuidado catálogo de cerca de cuatrocientas páginas, repleto de dibujos, planos y fotografías, que reúne dieciséis estudios sobre la trayectoria vital e ingenieril de Betancourt, los siete últimos a cargo de autores rusos cuyos textos hacen sentir al lector una emoción especial, quizás por la distancia en kilómetros del protagonista, que desarrolla en la Rusia del Zar Alejandro I su trabajo con pulcritud, lealtad y sacrificio. Una tarea que va más allá de las obras de ingeniería preocupándose, al frente del Instituto, en hacer ingenieros *homologados* que pueden enfrentarse con éxito a la tarea de construir las vías de comunicación que necesita una gran nación en crecimiento.
Y aunque han pasado cerca de dos siglos, nadie mejor que un ingeniero para entender a otro ingeniero. «Antes que cualquier otra cosa» —escribe en la Presentación José Antonio Torroja, Presidente del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos— «*Betancourt fue durante toda su vida un ingeniero consultor. Ni siquiera cuando tiene que abordar los problemas desde un nivel político, se resigna a no trabajar como ingeniero. Asombra ver cómo, un asesor de sus subordinados, lo mismo diseña la maquinaria auxiliar con que Montferrand construye la catedral de San Isaac, que proyecta*



el aparellaje de troquelado para la fábrica de la moneda de Varsovia».
Exposición y Catálogo han sido posibles gracias al esfuerzo de numerosas personas e instituciones, como la Universidad Estatal de San Petersburgo, Universidad Politécnica de Madrid, MOPTMA, CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) y CEHOPU (Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo).*
* *Para información y pedidos dirigirse a*: Centro de Publicaciones, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Pº de la Castellana 67, 28071 Madrid. Tel. (91) 597 61 87. Fax (91) 597 61 86. Precio del Catálogo: 4.500 ptas. (IVA incluido).

¿Hace calor en los lagos?

Algunos efectos ecológicos atribuidos hasta ahora a la acidificación de los lagos se podrían deber al calentamiento climático, afirman cuatro investigadores canadienses (D.W. Schindler *et al.*, *Nature*, *379*, 705, 1996). Además, el aumento de la exposición de los lagos boreales a las radiaciones ultravioleta estaría más relacionado con el calentamiento que con la disminución de la capa de ozono estratosférico.
David W. Schindler y sus colegas estudiaron entre 1971 y 1991 los lagos de una zona experimental situada al noroeste de Ontario, en Canadá.
Durante este periodo, la temperatura media de la región aumentó en un 1,6 % y la radiación ultravioleta incidente en alrededor del 10 %. Los investigadores realizaron varios experimentos de acidificación deliberada de los lagos. El estudio demuestra que el calentamiento y la acidificación provocan una disminución del carbono orgánico disuelto (DOC), lo que permite una mayor penetración de la radiación solar en las aguas de los lagos. En efecto, la penetración de rayos ultravioleta B en los lagos boreales es una función inversa de la concentración de DOC. ¿Por qué disminuye ésta? La principal causa es la disminución de las aportaciones terrestres de carbono, debido a que la sequía ha reducido el caudal de los ríos y el nivel de las capas freáticas.
La constatación es aún más interesante ya que los modelos climáticos predicen que el calentamiento del clima será más marcado en las regiones boreales. Como los lagos de las regiones boreales (se cuentan 700.000 en el este de Canadá) contienen generalmente poco carbono disuelto, la disminución de su nivel, según los autores del estudio, tendría que tener efectos negativos, como la desaparición de especies.

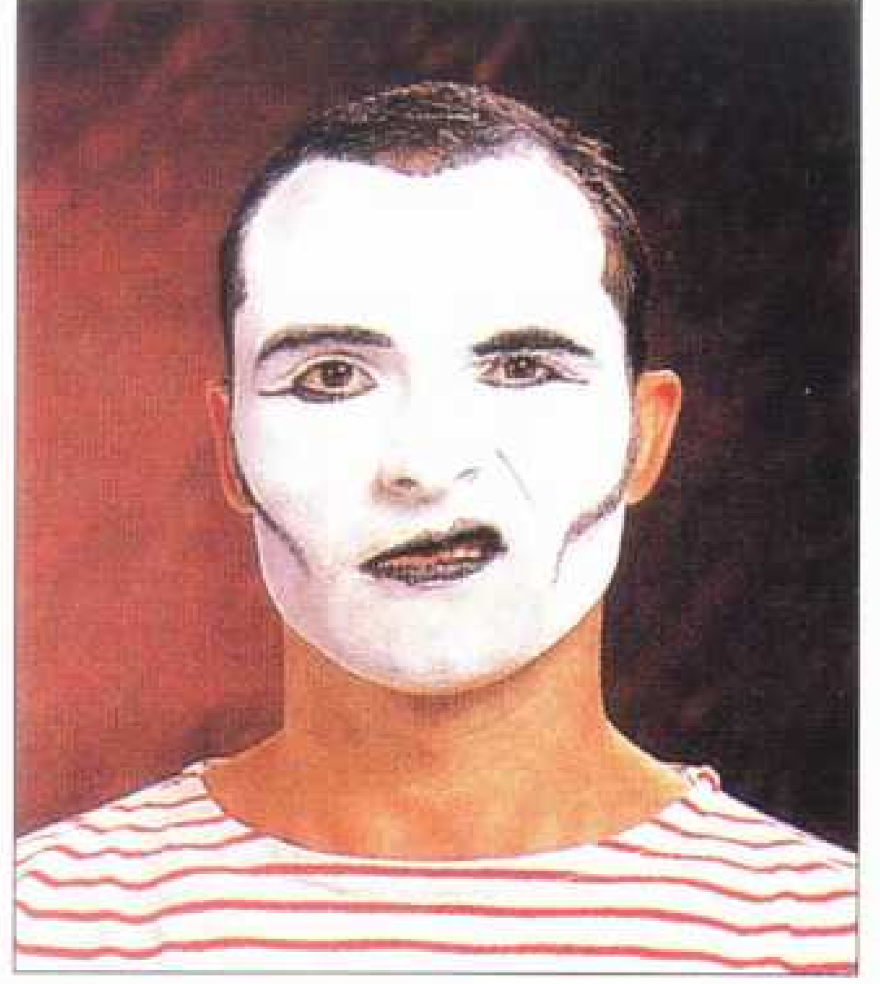
Los silencios del X
En las hembras de los mamíferos, uno de los dos cromosomas X se reduce al silencio en el estado embrionario. Esta inactivación otorga al sexo femenino la misma dosis de productos genéticos que los machos poseedores de un único cromosoma X. (Véase «La inactivación del cromosoma X», Mundo Científico, *nº 145, abril, 1994.) Según el equipo londinense de Neil Brockdorff, si se impide la expresión del gen* Xist *del ratón, descubierto en 1991 en el X, el cromosoma sigue «hablando»* (G.D. Penny et al., Nature, *379, 131, 1996). Se confirma de este modo que la inactivación del cromosoma X exige la expresión del gen* Xist *(XIST en el hombre), que sería por lo tanto el «centro de inactivación del X» buscado durante largo tiempo. Pero el mecanismo que interviene todavía es muy enigmático.*

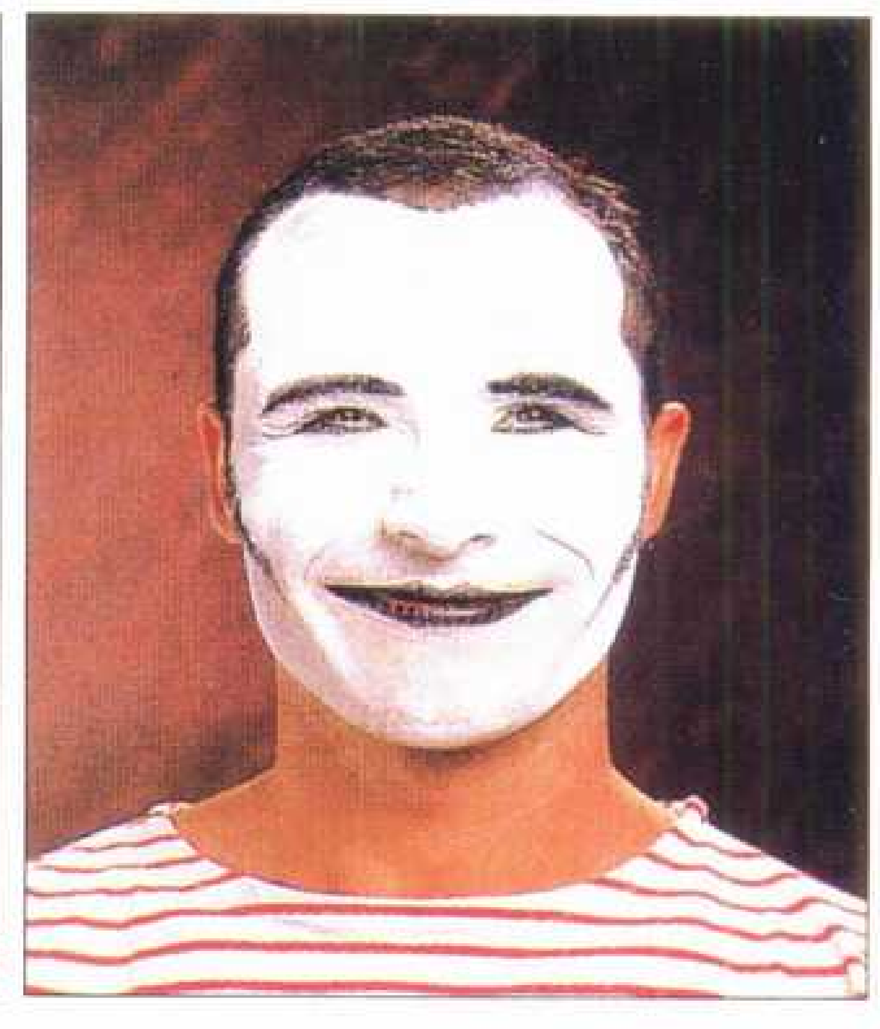
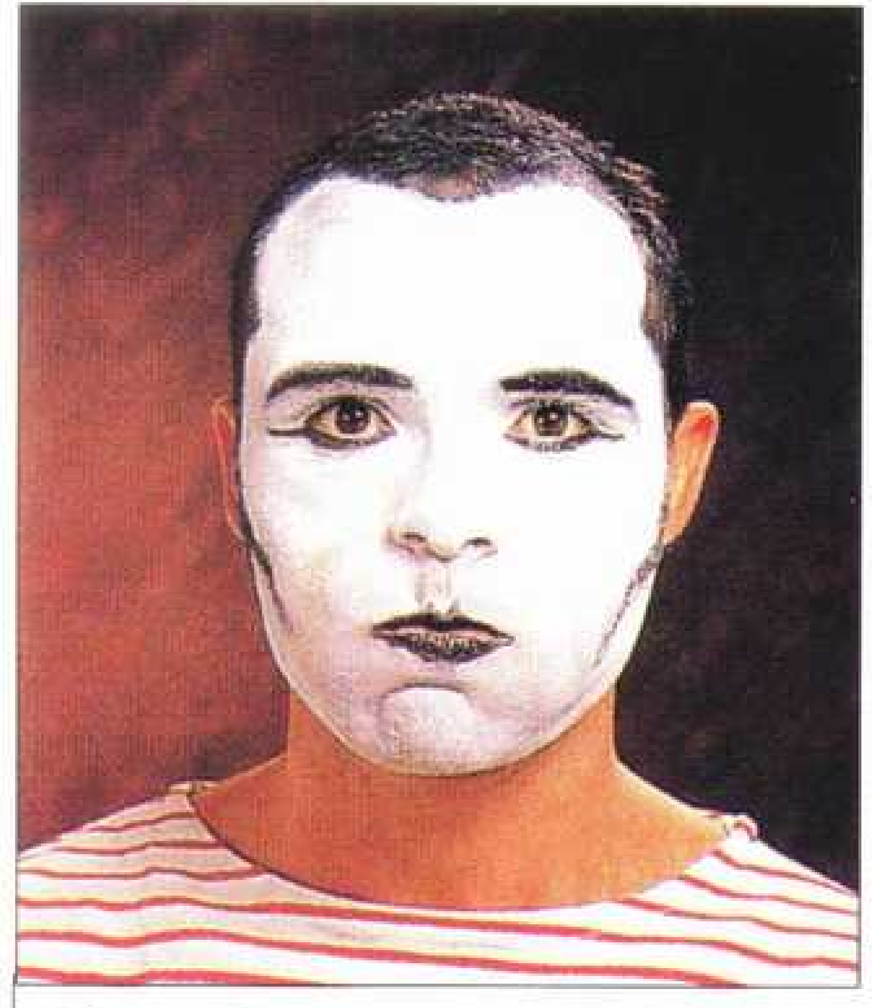
Una proteína que hace oscilar el calcio
La oscilina, éste es el nombre de pila de una nueva proteína cuya función parece determinante durante la fecundación del huevo (J. Parrington et al., Nature, *379, 364, 1996). Descubierta por un equipo británico en los espermatozoides del hamster, provoca en el huevo oscilaciones del nivel de calcio cuya importancia para el desarrollo precoz normal del embrión se conocen desde hace años.*

Aumenta el dominio del inglés
En 1993, el 94,4 % de los artículos catalogados en el SCI (Science Citation Index) *se publicaron en inglés (89,2 % en 1982). Francia, que resiste mejor que otras naciones, sólo edita el 44,9 % (28,6 % en 1982) en la lengua de Shakespeare. Imposible sorprenderse.* «El impacto medio de las revistas francesas que publican parcial o totalmente en inglés es 3,5 veces superior al de las que publican exclusivamente en francés». *(Fuente OST.)*

El rostro humano

El rostro humano es seguramente la parte de nuestro cuerpo que mejor conocemos. Lo observamos a diario frente a un espejo, aunque solemos fijarnos tan sólo en su aspecto general. Pero existen muchas facetas que normalmente pasan inadvertidas. ¿Hemos reparado alguna vez en que las dos mitades de nuestro rostro son diferentes, o en que lo que realmente conocemos es nuestra imagen reflejada? ¿Sabríamos definir qué es exactamente lo que permite identificar a una persona?
La cabeza, que representa tan sólo una octava parte de la altura total de un adulto, alberga muchos de los órganos y receptores sensoriales (vista, oído, gusto y olfato) que permiten al ser humano conocer el medio ambiente y reaccionar ante él. La elevada sensibilidad táctil de la zona de los labios y de otras áreas de la cara tiene además mucho que ver con determinados comportamientos, en especial en el terreno de la sexualidad.
El *Homo sapiens* posee una musculatura facial que dota al rostro de una enorme capacidad de expresión, fundamental en la comunicación humana. Es quizás este aspecto el que mayor relevancia tiene a la hora de estudiar el rostro, ya que existe toda una variedad de manifestaciones derivadas de su función expresiva que resultan de especial interés.
Las máscaras como forma de ocultar el rostro, el maquillaje como técnica de adorno y todas aquellas deformaciones de las partes de la cara destinadas a disfrazar la identidad, han tenido gran importancia para muchas culturas pasadas, y aún las tiene para las actuales.
Publicación editada con motivo de la exposición «El Rostro Humano», que se inauguró en la DOMUS, o Casa del Hombre, en La Coruña.
Casa de las Ciencias, Parque de Santa Margarita. La Coruña. Tel. (981) 27 18 28. Fax (981) 27 77 77.





El rostro humano posee más de 30 músculos unidos a los huesos de la cara y a la piel. (Fuente: Catálogo de la Exposición «El Rostro Humano».)

PECES DE RÍO EN ESPAÑA

En el Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC), de Madrid, se puede visitar hasta el 30 de junio la exposición «Como pez en el agua».
***Para más información*: Museo Nacional de Ciencias Naturales.**
C/ José Gutiérrez Abascal 2. 28006 Madrid.
Concertación de visitas: Tel. (91) 564 61 69.



Un ratón para probar las drogas

Una línea de ratones transgénicos recientemente creada por el francés Bruno Giros y sus colaboradores norteamericanos podrá servir de modelo para comprender los efectos estimulantes de las anfetaminas y de la cocaína (B. Giros *et al.*, *Nature, 379*, 606, 1996).
La dopamina, conocida por su función en la locomoción, la cognición y las emociones, es un neurotransmisor: una molécula que asegura la transmisión de la información de una neurona a otra, al nivel de la sinapsis. Para limitar la transmisión de la señal en el espacio y en el tiempo, se tiene que eliminar el neurotransmisor del espacio sináptico. Uno de los procesos que intervienen es la recaptura del neurotransmisor por moléculas de la membrana de la neurona presináptica, los transportadores. En los ratones transgénicos de Giros y sus colaboradores, el gen que codifica el transportador de la dopamina se ha vuelto inoperante. Y estos animales presentan un comportamiento locomotor hiperactivo, comparable al resultante de la administración de psicoestimulantes como las anfetaminas y la cocaína en ratones normales. Probadas en los ratones transgénicos, estas drogas han resultado ineficaces. Estos resultados sugieren que su acción se ejerce exclusivamente bloqueando el transportador de la dopamina: esto prolonga el

tiempo de acción de la dopamina en el espacio sináptico, y de ahí una mayor excitación. Este modelo de ratón transgénico tendría que facilitar el estudio de problemas farmacológicos y terapéuticos relacionados con la dopamina: dependencia de las drogas, enfermedad de Parkinson, esquizofrenia.

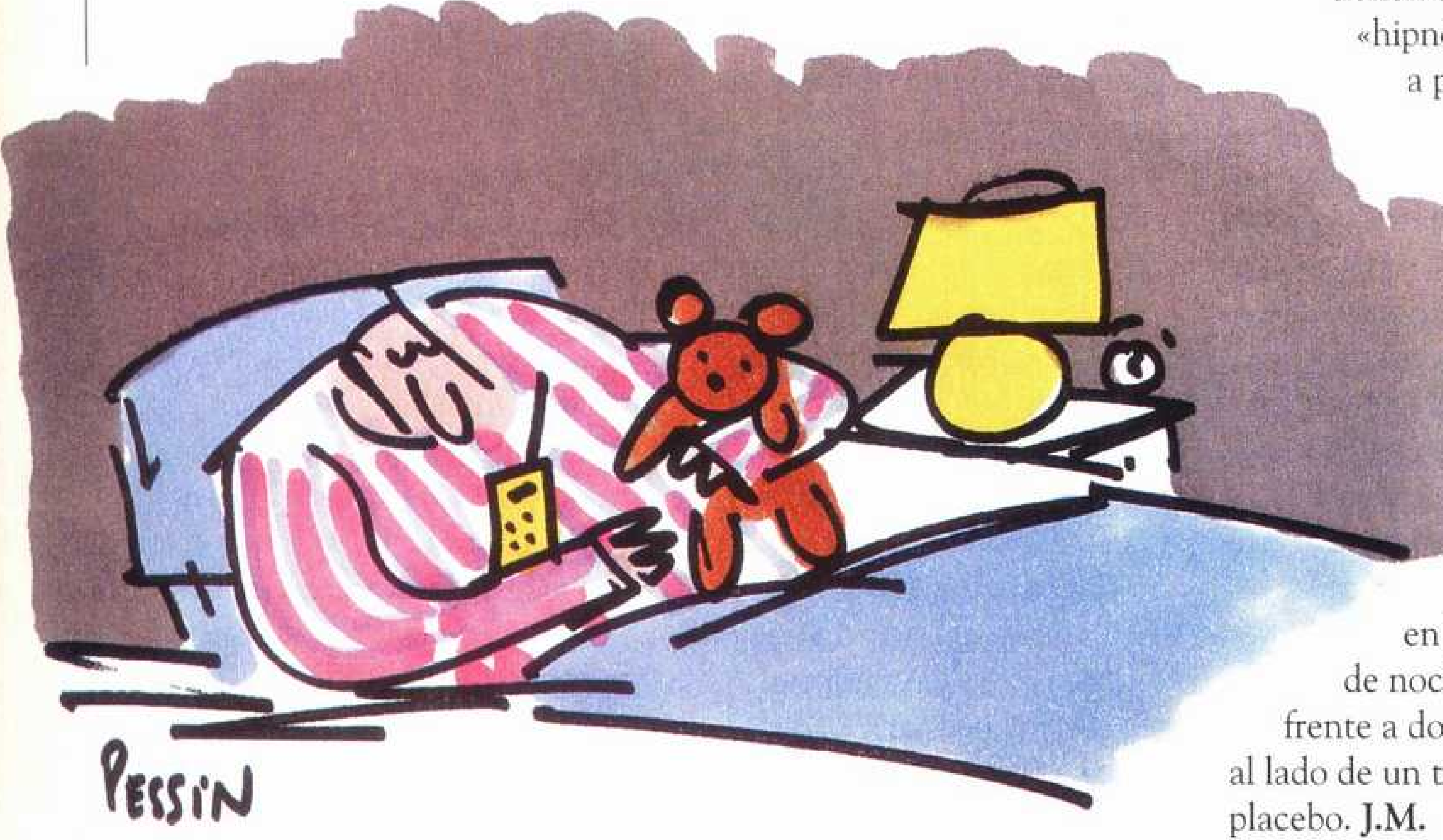
Proteínas en fase supercrítica

Cómo puede disminuir la industria química la utilización de disolventes orgánicos, que son una importante fuente de contaminación? Empleando por ejemplo dióxido de carbono (CO_2), que se comporta como un disolvente a una temperatura de 31 °C y una presion de 73,8 bar, en el estado llamado «supercrítico». Basta disminuir la presión para eliminar este disolvente inhabitual, cuyo interés se ve acrecentado por el hecho de que es muy barato, no tóxico y no inflamable. La extracción de proteínas es una aplicación de esta técnica estudiada por numerosas compañías farmacéuticas. Viejo obstáculo: la indisolubilidad de las proteínas en el CO_2 supercrítico. Pero un equipo norteamericano británico acaba finalmente de demostrar que algunos surfactantes forman micelas, una especie de minúsculas cajas constituidas por moléculas de surfactante que rodean una gotita de agua, en el CO_2 supercrítico (K. Johnston *et al.*, *Science*, *271*, 624, 1996). Por lo tanto las proteínas se pueden incorporar a las micelas. El surfactante utilizado en este estudio es un ácido orgánico en el que todos los átomos de hidrógeno de la cadena carbonada se han sustuido por átomos de flúor. Esto lo hace muy poco soluble en el agua, por muy soluble en el CO_2 supercrítico. Este importante resultado abre el camino a la utilización del CO_2 supercrítico en biología, ya que los enzimas extraídos por este método han conservado su actividad catalítica.

Teléfonos «matadores de sueños»

Un número creciente de alemanes utilizan «oniricidas». ¿Una nueva droga? Esta palabra se aplica en realidad... a los teléfonos móviles.

La culpa la tienen Klaus Mann y Joachim Röschke, dos investigadores de la Universidad de Mainz: han descubierto que las ondas electromagnéticas producidas por los radioteléfonos móviles numéricos pueden reducir el tiempo que una persona que duerme dedica al sueño paradójico, el estado del sueño asociado a los sueños (*Neuropsychobiology*, 33, 41, 1996). En Mainz, en un estudio financiado por Deutsche Telekom, los investigadores pidieron a catorce personas, sanas de cuerpo y mente, que pasasen dos noches en un laboratorio de sueño: la primera con un teléfono móvil colocado a 40 cm de su cabeza, la segunda con un teléfono placebo fuera de servicio. El teléfono en funcionamiento emite señales a una frecuencia de 900 MHz con una intensidad de 8 vatios. Los registros electroencefalográficos de las ondas cerebrales han demostrado que los teléfonos celulares disminuyen de forma significativa la proporción del sueño paradójico en una noche: del 17 % (placebo) a menos del 14 %. Los teléfonos móviles también aumentan la amplitud de las ondas cerebrales durante el sueño paradójico. *«Pero desconocemos el significado de este descubrimiento»* admite K. Mann. Aunque los «onirófilos» están decepcionados con estos resultados, los «morfofilos» se pueden congratular de dos conclusiones complementarias. En primer lugar, los sujetos no saben decir, cuando despiertan, si han dormido junto a un teléfono en funcionamiento o fuera de servicio. Pero, sobre todo, los teléfonos celulares tienen un efecto «hipnótico»: a partir del momento que los durmientes han cerrado los ojos, necesitan, en promedio, nueve minutos y medio para caer en el sueño con un teléfono en funcionamiento en la mesita de noche, frente a doce minutos al lado de un teléfono placebo. **J.M.**



Petición de ayuda
Robert Walker, presidente de la comisión Science *de la Cámara de Representantes norteamericana, está harto:* «Presionamos a los investigadores para que nos ayuden a establecer prioridades. Pero la mayoría de las veces nos responden con una fórmula del tipo: "Todos los programas son buenos y todos tienen que recibir un presupuesto"».

Electricidad y salud
Afectan los campos electromagnéticos a la salud humana (líneas de alta tensión, etc.)? Para responder a una «ansiedad creciente del público» y colmar un vacío de pruebas científicas, la OMS inicia un programa internacional de investigación de cinco años, dotado con un presupuesto de 3,3 millones de dólares.

¿Hacia un turismo de la esterilidad en Alemania?
Wolfgang Künzel, presidente de la Sociedad Alemana de Ginecología y Obstetricia se indigna: si no se abroga la ley alemana que prohíbe que las mujeres «alquilen» su útero a parejas estériles, las parejas sin hijos se dirigirán a países en los que esta práctica sea legal.

Mucoviscidosis e infecciones respiratorias
La mucoviscidosis, que es el resultado de mutaciones del gen CFTR, se caracteriza en especial por graves alteraciones respiratorias complicadas por infecciones. Unos biólogos norteamericanos han descubierto que las células epiteliales pulmonares afectadas por la mutación más frecuente (ΔF508) no ingieren in vitro *las bacterias* Pseudomonas aeruginosas (G. Pier et al., Science, 271, 64, 1996). *Pero, normalmente, este mecanismo de ingestión (seguido de la destrucción de las células) protege probablemente a las vías respiratorias de estas bacterias patógenas. Lo que explicaría la sensibilidad de los pacientes a las infecciones respiratorias.*

¿ISLA FLOTANTE O PORTAAVIONES?

Un nuevo concepto de plataforma gigante, inspirado en los avances del offshore petrolero, pone en duda la pertinencia estratégica de los portaaviones clásicos.



Están los portaaviones tan poco adaptados a la era moderna como los dinosaurios al principio de la era Terciaria? Ésta es la pregunta que llevan a plantearse los estudios de prospectivistas militares norteamericanos y franceses. Proponen, en efecto, un nuevo concepto de base marina, constituido por una amplia plataforma de tecnología *offshore* de escasa movilidad pero resistente a ataques intensos de misiles. La constatación de partida es simple: las marinas militares todavía razonan en términos de batallas como la de Midway (1942), en las que intervenían navíos rápidos que se enfrentaban en alta mar. Pero la velocidad ya no es la primera necesidad de la estrategia marina. Los progresos de los misiles han vuelto a los navíos muy vulnerables, salvo que se carguen de costosas defensas. Es cerca de las costas, donde se desarrollan las megápolis, donde se desatarán sin duda los conflictos del futuro. Un prospectivista, de la Delegación General de Armamento Gilles Polycarpe, ha elaborado en el Centro Técnico de Sistemas Navales de Tolón el concepto de «fortaleza flotante» o de «sistema seudoestático»: una plataforma insumergible de 1.200 m de longitud por 400 m de anchura, movida por motores diesel o reactores nucleares. Capaz de desplazarse a 6 nudos, se posicionaría, por ejemplo, en el Mediterráneo. Un estudio realizado por la empresa de ingeniería Bertin indica que el coste de un ingenio de este tipo se acercaría a los 1.112 millones de dólares, es decir sensiblemente la mitad que un portaaviones moderno. La masa de la construcción garantizaría una resistencia a los misiles muy superior a la de los actuales buques de guerra, mientras que su carga útil le permitiría almacenar una potencia de fuego considerable. *«Hay que razonar sobre ingenios tales que, si son alcanzados, no se pierda el navío»*, dice Gilles Polycarpe. El hormigón de los cascos tiene además la ventaja de requerir un mantenimiento mucho menor que el acero. La marina de Estados Unidos también se interesa en este concepto: con el nombre de MOBS, estaría constituida por módulos construidos en lugares costeros y transportados por remolcadores al lugar deseado, donde se ensamblarían (J.F. Peel Brahtz, *Modularised ocean basing system*, Naval Civil Engineering Laboratory, 1989; R. Holzer, *Defense news*, abril de 1994). La diferencia fundamental con la idea francesa es la ausencia de movilidad autónoma de la base. Este enfoque también se puede reconvertir a formato reducido en forma de pontones gigantes de 350 m de largo por 60 m de ancho, utilizados como los barcos pero menos costosos y menos vulnerables. La realización de este concepto no supone una ruptura tecnológica importante, ya que el principal desarrollo requerido es la técnica de juntura de los módulos. De hecho, las plataformas flotantes se están convirtiendo en norma en la industria petrolera, necesarias por la profundidad cada vez mayor de la explotación. Noruega acaba de establecer concesiones de explotación en fondos de 1.400 m. En marzo, una plataforma de este tipo, puesta a punto por Bouygues Offshore dejó Francia para ser remolcada hasta el Golfo de Guinea, a cargo de Elf Congo. Mide 220 m por 46 m y 16 de profundidad (Valenchon *et al.*, *Cités marines*, Fondation 2100/SEE, 1995, p. 57). Mientras que la construcción por Francia de un segundo portaaviones constituye un «objetivo» de la planificación a largo plazo del esfuerzo de defensa, los responsables se podrían interesar por esta propuesta alternativa y económica. ■



Inmensas plataformas móviles, como el proyecto de Gilles Polycarpe, podrían sustituir a los portaaviones a un precio ventajoso. La tecnología está madura como demuestra (arriba) la plataforma petrolífera inaugurada por Elf. (Según un dibujo de Jean-Marie Cuzin, fotografía Elf-Aquitaine.)



La biónica avanza

Antonio Pedotti, director del Centro de Bioingeniería de Milán, coordina el programa europeo de biónica RAFT.

¿Cuál es la situación de la bioingeniería?

Prótesis colocadas en la pierna de los pacientes permiten que centenares de parapléjicos den algunos pasos. La investigación sobre la estimulación del sistema neuromuscular consigue que una prótesis, controlada desde el exterior del cuerpo pero situada en su interior, interaccione con el sistema nervioso y estimule los músculos de las piernas de parapléjicos para permitirles caminar. Sólo falta industrializar esta técnica. Se están desarrollando dos proyectos europeos: RAFT ampliará estos resultados a otras funciones, los miembros superiores y la respiración; SENSATIONS apunta a registrar la señal de los nervios, para realizar sistemas en circuito cerrado sin control externo: una vía para comandar los nervios, otra para leer las señales.

¿Para cuándo la aplicación práctica?

Dentro de cinco años, los parapléjicos podrían caminar gracias a un estimulador, aunque con muletas o un caminador. La respiración, ya se puede llevar a la práctica. Las prótesis podrían reconstruir las sensaciones: ya hay implantes cocleares para los sordos. Habrá muchos avances en este campo y en el de la ceguera.

¿Cuáles son los obstáculos?

El problema científico reside en definir una estrategia de control, y su adaptación a diversas situaciones. En el plano tecnológico, las dificultades son la miniaturización y la biocompatibilidad entre prótesis, neuronas y músculos. También hay un problema quirúrgico: no es tan sencillo colocar en el cuerpo un dispositivo electrónico conectado al exterior. También se tendrán en cuenta la rehabilitación, las dificultades psicológicas, el aprendizaje y la fatiga . ■

Anticuerpos contra los plaguicidas

Para dosificar mejor los plaguicidas presentes en el agua potable, un nuevo procedimiento utiliza anticuerpos como «anzuelo». Los métodos actuales recurren mucho a los disolventes, que a su vez son tóxicos o son poco fiables. Los equipos de François Le Goffic (Escuela Nacional Superior de Química de París) y de Marie-Claire Hennion (Escuela Superior de Física y Química Industriales de París) han tenido la idea de utilizar las interacciones antígeno-anticuerpo (*Anal. Chem.* 67, p. 2.451, 1995). La muestra de agua (200 ml) a analizar pasa por un cartucho que contiene unas bolitas en las que están fijados anticuerpos específicos de la sustancia a medir. Los anticuerpos son producidos por conejos, en los que suscita esta producción por inyección de la sustancia investigada. Al pasar por el cartucho, la sustancia es capturada y queda concentrada en una sola etapa. Las sustancias coextraídas se eliminan por lavado. Luego se saca el plaguicida del cartucho con una pequeña cantidad de disolvente orgánico y se cuantifica por cromatografía. Los investigadores trabajan en la optimización del procedimiento y en su ampliación a diversas sustancias, así como en la dosificación simultánea de varios productos de un mismo grupo. ■

EL CIBERNAUTA Y SU DOBLE NUMÉRICO

La videocomunicación choca desde hace tiempo con el hecho de que el volumen de información de las imágenes supera la capacidad de transporte de las redes actuales. Una investigación realizada en Francia por el Instituto Nacional Audiovisual tendría que paliar este inconveniente: la idea consiste en transmitir puntos característicos del rostro de una persona, que animarán a distancia a su «doble» numérico. El resultado es rústico, pero hace posible una buena expresividad. Y sobre todo se puede transmitir por las redes habituales, Internet entre ellas. En este «Proyecto Televirtualidad», el rostro de síntesis es controlado por un rostro real filmado por una cámara. No hay necesidad de marcadores, a diferencia de sistemas comparables, como el Motion Analysis. El análisis de la imagen extrae informaciones sobre los movimientos de la cabeza, de la boca, la dirección de la mirada y la bajada de los párpados. El tratamiento sigue varias etapas, que reagrupan los píxeles por zonas homogéneas, y luego eligen los puntos de referencia en los que se calculan los movimientos. A continuación se transmite no la imagen, sino informaciones sobre las transformaciones del modelo en el tiempo, que sólo requieren un bajo caudal. Esta técnica tendría que permitir organizar en la red citas a través de dobles numéricos. Los investigadores trabajan en la mejora de la fidelidad de la representación y en la sincronización de la palabra del personaje con su imagen. ■

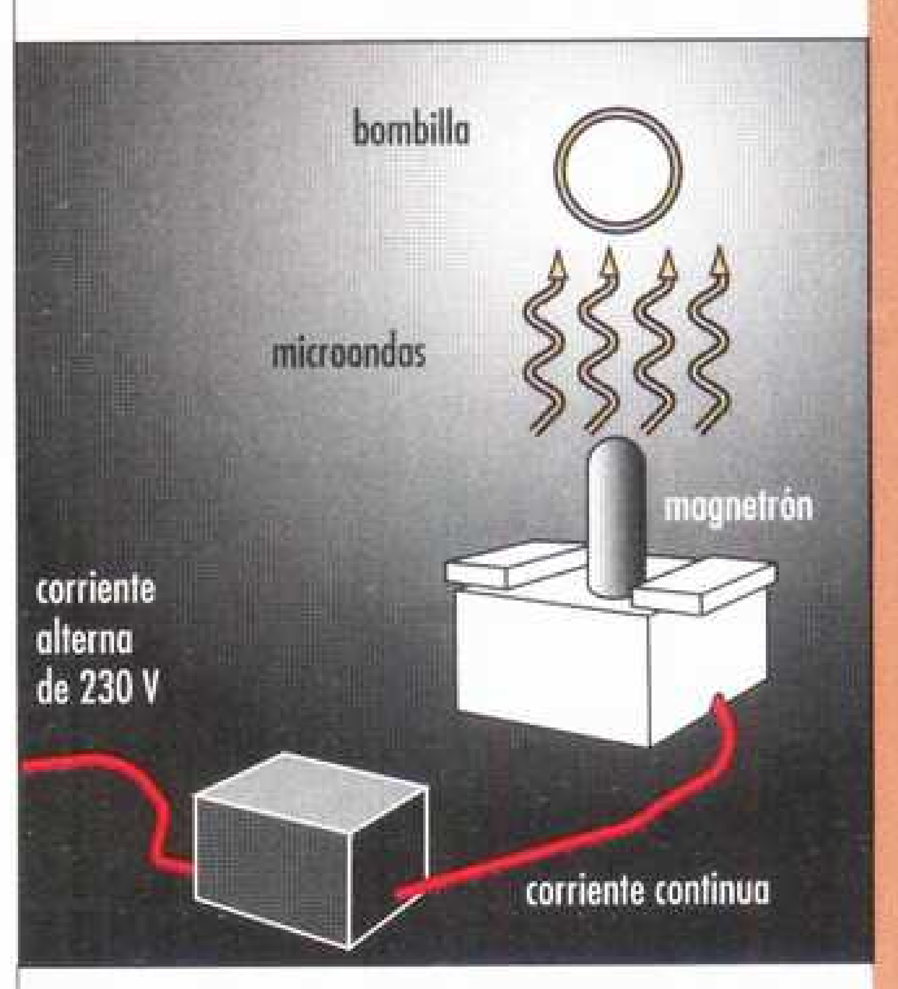


Con los puntos característicos de la expresión *de una cara (izquierda) aplicados a un modelo numérico (derecha) se podrán realizar videoconferencias en Internet. (Foto INA.)*

Para más información: http://www.ina.fr/INA/Recherche/TV/

Bombilla más ecológica que los fluorescentes

La sociedad norteamericana Fusion Lighting, situada en Rockville (Maryland), ha puesto a punto una lámpara que produce una luz parecida a la luz natural con una muy buena eficacia energética. El azufre emite una luz muy blanca y muy brillante cuando está expuesto a ondas de muy alta frecuencia. En el nuevo procedimiento, se encierra azufre en presencia de argón en una ampolla esférica en la que un magnetón genera microondas. Por efecto de éstas, los átomos de azufre se asocian en pares emitiendo fotones en un amplio intervalo de longitudes de onda que cubre casi toda la parte visible del espectro de la luz solar. Además, estas lámparas tienen una intensidad luminosa de 100 lumen por vatio, frente a los 17 lumen/vatio en las lámparas de incandescencia y los 70 a 80 lumen/vatio de los fluorescentes. Todavía en fase de pruebas en Estados Unidos, estas bombillas —que no obstante sólo funcionan a potencias de varios miles de vatios— ya son comercializadas en Suecia por la empresa CTE (*Celsius Tech Electronics*), que ha firmado un acuerdo de distribución con Fusion Lighting. Se han instalado cuarenta y ocho lámparas en oficinas de clasificación postal suecas y otras lo serán en hospitales, fabricas supermercados, etc. ■



La emisión de luz es el resultado del efecto de microondas en el azufre contenido en una bombilla.

El taxi es un robot

En Rotterdam se van a instalar automóviles automáticos para enlazar una estación de metro y una zona de actividad alejada 1,2 km. Éste tendría que ser el primer medio de transporte colectivo automático sin raíles. Los coches se desplazarán por una red reservada de vías de asfalto. Su posición se conocerá memorizando el número de vueltas de las ruedas y por posicionamiento respecto a balizas electromagnéticas. La circulación la gestionará un ordenador que conocerá la posición de todos los vehículos.

¡Doctor, mi tele es verde!

El ministerio alemán de Investigación apoya un proyecto de televisión que respeta el medio ambiente y que tendría que estar terminado en 1998. Agrupa a varios fabricantes, entre ellos Thomson-Brandt. Condiciones exigidas: consumo eléctrico reducido, débil radiación electromagnética, materiales y piezas pensados para facilitar el reciclaje y capacidad de integrar fácilmente las novedades técnicas, con objeto de evitar una renovación demasiado frecuente.

A la una, a las dos, a...

La informática funciona con el sistema binario, que sólo distingue entre dos «estados». Pero en el interior de una memoria no es impensable distinguir entre cuatro estados (algo así como 0, 1, 2 y 3 voltios), ya que el incremento de complejidad queda compensado por la duplicación de la capacidad. Intel indica que trabaja en este tema; Samsung anuncia que podría comercializar dentro de un año un circuito basado en este principio; y un pequeño proyectista californiano, ISD, declara que domina una solución que permite distinguir 16 niveles, lo que equivaldría a almacenar cuatro bits en cada unidad de memoria.

Vibroalarma

La CNET, en Francia, ha puesto a punto un sistema de alarma, útil para avisar a los sordos que están recibiendo un mensaje de telecomunicación (Minitel u otro). Se presenta en forma de un brazalete-reloj que incluye reloj, receptor de radio (el cuerpo humano sirve de antena), vibrador y circuito de control.

Deep Blue en apuros... de momento

El quincuagésimo aniversario de la informática merece algo más que algunas velas y la nueva puesta en marcha simbólica de un pedazo de Eniac.(1)

La ACM (*Association for Computing Machinery*), asociación cultural de 49 años de edad, tuvo la idea de organizar una partida en la cumbre entre el mejor jugador de ajedrez de la especie humana y el ordenador más potente jamás construido, para practicar el mismo deporte, una máquina llamada Deep Blue, dimensionada a medida por la escudería de IBM. Esto no se había hecho nunca: un torneo de seis partidas de siete horas como máximo, recompensado con un premio de 500.000 dólares (400.000 para el ganador y el resto para el perdedor). Según los especialistas, el análisis de las confrontaciones más recientes de este tipo daba ventaja al ordenador. De hecho, Deep Blue ganó la primera partida con las blancas. Garry Kasparov no fue el único en declararse impresionado. La segunda mano la ganó él con las blancas. Durante un cierto tiempo se tuvo la impresión de que el hombre había encontrado su igual. Esta impresión duró todavía dos partidas más, terminadas en tablas. Pero las dos últimas volvieron a poner los péndulos en hora: Kasparov ganó dos veces, una de ellas con las negras. En cuatro partidas, el maestro había encontrado los defectos de la coraza del montón de chatarra... o más bien de silicio. A *grosso modo*, la técnica utilizada era la de siempre: desarrollo de una parte del árbol de jugadas legales, hasta una «profundidad» determinada en función de la potencia de cálculo disponible y de la estabilidad de la situación, *evaluación* estática de las posiciones alcanzadas y luego propagación hacia la raíz del árbol de estos valores. Para abreviar, se dice que Deep Blue calcula *todas* las posiciones posibles. Nada más falso, tanto para él como para sus competidores, y desde hace mucho tiempo. Unos ardides algorítmicos, el más viejo de los cuales se llama «Alpha-Beta», permiten evaluar seriamente las jugadas posibles explorando solamente un pequeño porcentaje del imponente árbol que emerge de las reglas del ajedrez. En mitad de una partida se pueden realizar legalmente un promedio de veinte movimientos. Esto significa 400 posiciones después de un cambio (se dice dos «semijugadas»), 160.000 en profundidad dos y 2. 000.000.000 en profundidad cuatro. Deep Blue evalúa aproximadamente mil millones de posiciones por segundo, unas cien mil millones para realizar una jugada, para lo cual, en general «desciende» a la profundidad 7 (14 «semijugadas»). Y todo esto para dejar de lado una enorme cantidad de posibilidades... Para alcanzar este inigualado nivel de prestaciones, el equipo de IBM utiliza un calculador científico de arquitectura paralela del catálogo de la firma, aumentado con un enjambre de 256 chips especializados en la evaluación de posiciones.

(1) Primer ordenador, fabricado por IBM, que este año celebra sus cincuenta años.

SILICON GRAPHICS SALVA A CRAY

El pequeño gigante de pies de barro, Cray, ha encontrado un ala protectora con Silicon Graphics. Se han visto parejas peor avenidas. Lo que en Cray siempre ha sido gigante es la potencia de cálculo de sus supercalculadores: desde el principio, esta firma no ha querido oír hablar de otra cosa y su fundador, Seymour Cray, proclamaba también que no tenía otro objetivo que realizar siempre «el ordenador más potente del mundo». El «paralelismo homeopático» (cuatro, ocho, dieciséis procesadores) fue durante mucho tiempo un credo inquebrantable en Cray. Esta política funcionó durante un tiempo para el líder incontestable del supercalculador, pero resultó peligrosa cuando este mercado se estancó (debido en parte a la caída del muro de Berlín) y, además, tuvo que dejar lugar al «paralelismo masivo». Entonces, Cray tuvo que proponer «crayets» y orientarse al paralelismo, pero ya era muy tarde. Su cifra de negocios en 1995, de 676 millones de dólares, había bajado un 27 % con respecto al año anterior e iba acompañada de 226 millones de pérdidas...
Por su parte, Silicon Graphics logró alcanzar una cifra de negocios gigantesca (2.200 millones de dólares en 1995) siguiendo una trayectoria bastante opuesta. Basándose en una gama muy reputada de «estaciones de trabajo gráficas» esta firma introdujo progresivamente «servidores gráficos» cada vez más potentes, hasta el punto de que, hoy en día, es el número uno del nicho de los calculadores científicos que valen entre 100.000 y un millón de dólares. En total, la pareja SG+Cray representa sobre el papel el 43 % del mercado del supercalculador.
Pero habrá trabajo para «casar» las gamas de los dos fabricantes que, por ejemplo, explotan tres familias de procesadores RISC: MIPS (filial de SGI) por una parte y SPARC (Sun) y Alpha (Digital Equipment) en Cray...

Megadisquete

En apariencia es un disquete, pero contiene un equivalente a 80 disquetes: ¿qué es? Es el LS-120 de 3M y Matsushita. Este soporte magnético no brilla especialmente por su capacidad, porque ya se han anunciado cifras de este orden. Por otra parte, es necesario saber por qué Compac, por ejemplo, ha decidido integrar una unidad LS-120 en dos recientes modelos de su gama Deskpro. El principal argumento es la compatibilidad con el actual disquete, que podrá ser leído y escrito por la unidad LS-120.

23 GB sobre un eje

Puede soportar el contenido de 37 CD-ROM. Y sin embargo, sólo se trata de un disco magnético de formato estándar de 5 1/4 pulgadas. Para alcanzar esta capacidad récord de 23,4 GB, que dobla la capacidad récord máxima precedente, ha sido necesario empilar 14 plataformas.

Un Terabit por segundo

¡Un billón de bits por segundo a través de una fibra óptica! Este récord simbólico de transmisión de datos (1 Tbit/s) acaba de ser logrado hace poco de manera simultánea por tres equipos pertenecientes a Fujitsu, a NTT (Nippon Telegraph and Telephone Corp.) y a AT&T. Un Tbit/s representa el equivalente a 400 veces el mayor flujo propuesto actualmente al mercado: 2,5 Gbits/s. Y algo así como el contenido de 200 CD por segundo o 12 millones de comunicaciones telefónicas simultáneas...

Java de origen

El famoso lenguaje Java, que permite incluir «pequeños fragmentos de software» en una página publicada en el World Wide Web, puede ser interpretado (ejecutado) por cualquier software de navegación que funcione en cualquier máquina. Pero Sun, el inventor, pronto propondrá microprocesadores ad hoc, que los ejecutarán bastante más rápidamente que cualquier otro software. Son candidatos de elección para estos famosos «network computers» que algunos ven ya suplantando al PC.

DIEZ AÑOS DESPUÉS DE CHERNÓBIL



(Cliché V. Ivleva/Magnum)

PRIMER BALANCE SANITARIO

Pierre Verger
y Denis Bard

Graves consecuencias y muchas incógnitas

PIERRE VERGER Y DENIS BARD son investigadores del laboratorio de epidemiología y evaluación del detrimento sanitario del Instituto francés de protección y seguridad nucleares.

EL CURIE (Ci) es la antigua unidad internacional de actividad, que ha sido sustituida por el becquerel (Bq). 1 Bq respresenta una desintegración por segundo. 1 Ci es igual a $3,7.10^{10}$ Bq.

El accidente de Chernóbil ha tenido importantes consecuencias sanitarias para las poblaciones vecinas y para los trabajadores que acudieron a limpiar el lugar. Su responsabilidad en la epidemia de cánceres de tiroides y en la multiplicación de trastornos psicológicos está fuera de toda duda. Otras consecuencias probables, en lo que se refiere a cánceres y malformaciones congénitas, son más difíciles de establecer debido a lagunas en el seguimiento de las poblaciones.

El 26 de abril de 1986, la explosión del reactor nº 4 de la central nuclear de Chernóbil provocaba una emisión de radiactividad a la atmósfera de unos 150 millones de curies (Ci)* durante más de diez días. El desplazamiento de la nube radiactiva por Europa provocó contaminaciones variables según las regiones. Los elementos más volátiles, como el cesio 137 y el yodo 131, fueron transportados a muy grandes distancias. En Ucrania, Rusia y Bielorrusia, 130.000 km² fueron contaminados con más de 40 kilobecquerels (kBq) por metro cuadrado (1 curie por km²).[1] El personal de la instalación y los equipos de socorro que acudieron al lugar en las primeras horas del accidente sufrieron una irradiación aguda procedente de los fragmentos del reactor diseminados, así como de la nube y de los depósitos radiactivos. Debido a lo elevado de las dosis recibidas, 237 personas fueron hospitalizadas, 28 de las cuales fallecieron en las semanas siguientes; desde entonces, se han producido otros diez fallecimientos. La suerte de las demás personas no es conocida.[2]

Los «*liquidadores*» son las personas que acudieron a limpiar las zonas contaminadas en 30 kilómetros a la redonda del reactor. Su número se estima en más de 600.000. Estas personas sólo excepcional-

EL MILISIEVERT (MSV)
es la unidad internacional de dosis eficaz. Se utiliza para suministrar estimaciones de dosis al organismo en condiciones de irradiación variadas (externa, interna). Tiene en cuenta la eficacia de los distintos tipos de radiación y de la radiosensibilidad de los órganos.

mente fueron equipadas con dosímetros. Se estima que el 10 % de ellas sufrió dosis de más de 250 milisievert (mSv)*. A modo de comparación, la dosis por irradiación natural a lo largo de toda una vida* es de unos 150 mSv. Su seguimiento sanitario es difícil porque en la actualidad están diseminadas por todo el territorio de la ex Unión Soviética. De los 135.000 habitantes de la zona de 30 km prohibida desde el accidente, 115.000 fueron evacuados durante la primera semana. Su irradiación fue externa y en menor grado interna por inhalación de polvo radiactivo. Según las fuentes, la estimación de la dosis externa media para estas poblaciones se sitúa entre 15 y 140 mSv.

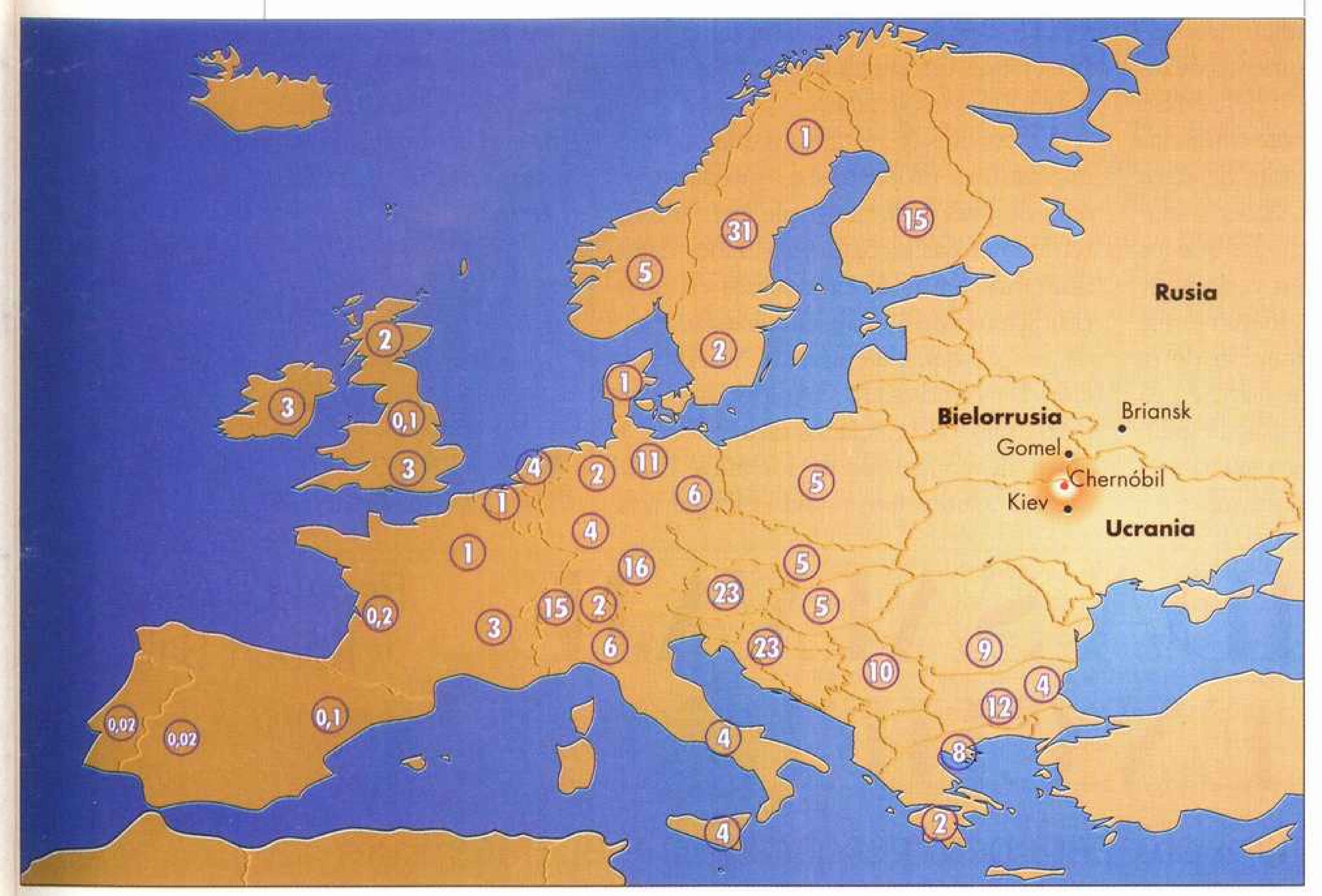


Figura 1. Este mapa muestra la ***distribución*** *de los depósitos de cesio 137 en los países de Europa central y occidental en los días que siguieron el accidente de Chernóbil (en miles de becquerels por m²). En la zona de los 30 km alrededor del reactor, la contaminación rebasó ampliamente 1,5 millones de Bq/m² (fuente IPSN).*

LA «DOSIS VIDA ENTERA»
es la dosis que recibirá un individuo durante toda su vida si es irradiado de un modo continuo u ocasional. Para establecerla, se considera una vida de 50 años para el adulto y una de 70 para el niño.

Los habitantes de las zonas contaminadas están constantemente sometidos a una irradiación externa y a una irradiación procedente de la ingestión de alimentos contaminados; 270.000 viven en zonas cuyo nivel medio de contaminación por cesio 137 es superior a 0,6 millones de Bq/m² (15 Ci/km²) y 3.700.000 en zonas de un nivel medio comprendido entre 0,04 y 0,6 MBq/m². Se estima que las dosis a lo largo de toda una vida están comprendidos entre 80 y 400 mSv para los primeros y entre 70 y 220 mSv para los segundos.

En cambio, el territorio de la ex Unión Soviética ha sufrido poca contaminación. Su población, de unos 280 millones de personas en 1991, vive en territorios cuyo nivel de contaminación por cesio 137 es inferior a 0,04 MBq/m² (1 Ci/km²). La dosis media a lo largo de toda la vida se estima en menos de 1 mSv.

Finalmente, en el resto de Europa, los niveles de contaminación por cesio 137 han variado aproximadamente entre 1 kBq/m² y 0,04 MBq/m². En Francia, la dosis media a lo largo de toda la vida por causa del accidente de Chernóbil se estima en 0,16 mSv, mientras que la dosis anual debida a la irradiación natural es de 2 mSv. Todas estas estimaciones indican meros órdenes de magnitud. Probablemente, hay fuertes variaciones entre individuos. El principal efecto sanitario observado desde el accidente ha sido un aumento del número de cánceres de tiroides en niños de menos de 15 años a partir de 1990 en Bielorrusia, más tarde en Ucrania y, por último, a partir de 1992, en las regiones de Briansk y Kalouga, en Rusia.[3] Desde el accidente, se han detectado unos 700 nuevos casos, cuando, en tiempo normal, habrían debido detectarse como máximo en estas regiones unas pocas decenas de cánceres. Los cánceres son mayoritariamente agresivos y van frecuentemente acompañados de metástasis ganglionares cervicales.

Pese al escepticismo inicial, la realidad del aumento de estos cánceres y la responsabilidad en ellos de la radiactividad liberada durante el accidente son ahora reconocidas.[4] En efecto, la mitad de los casos corresponde a las regiones más contaminadas. Por otra parte, el aumento aparece en niños nacidos antes de la catástrofe o expuestos durante el embarazo, pero no en los nacidos más tarde, que no han sido expuestos a los yodos radiactivos de periodo corto. No obstante, las causas precisas de la epidemia de cáncer de tiroides infantil todavía no han sido bien dilucidadas. La irradiación externa, que es un factor de riesgo bien conocido de este cáncer, pudo desempeñar algún papel. La irradiación interna por el yodo 131 y otros yodos de periodo corto está presumiblemente implicada, pese a que hasta ahora el papel carcinógeno del yodo 131 no había sido establecida en los seres humanos. Por otra parte, la carencia alimentaria en yodo, endémica en las regiones afectadas por el accidente, es un posible factor de riesgo del cáncer de tiroides y pudo favorecer la emergencia de la epidemia.

En Bielorrusia, se ha informado también de un aumento moderado de la frecuencia de cáncer en los adultos. Este aumento es probablemente debido, en parte, a la detección de tumores que existían antes del accidente pero que eran demasiado pequeños para provocar síntomas. Estos tumores son frecuentes en el adulto y pueden evolucionar muy lentamente durante varios años. Puede que fueran revelados tras el accidente por ecografías sistemáticas. La situación relativa a los demás tipos de cáncer es menos clara. Por ahora, no se ha observado ningún aumento de leucemia y de otros cánceres. Estudios epidemiológicos* en niños

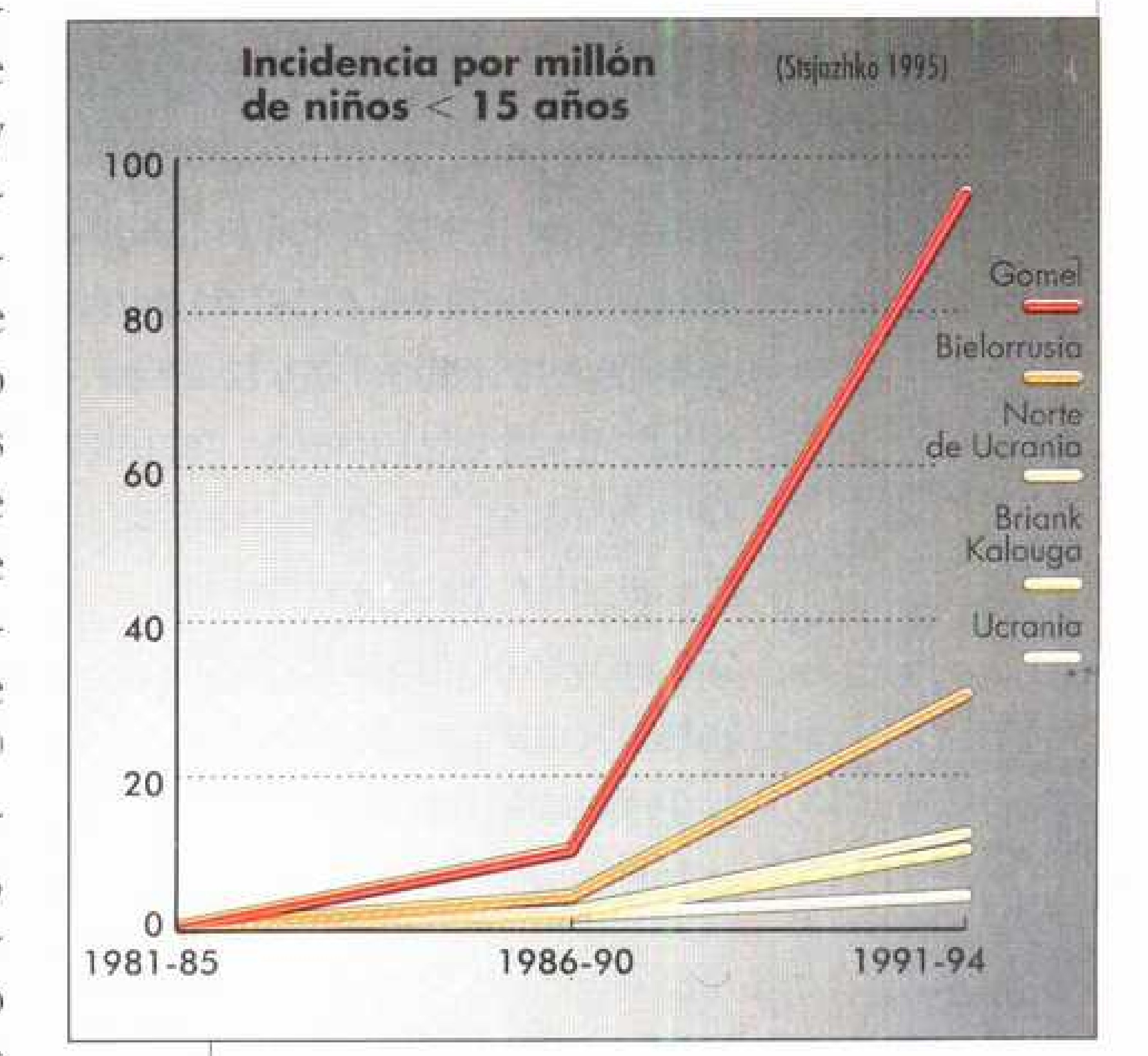


Figura 2. Incidencia anual media *de cáncer de tiroides infantil en Rusia, Bielorrusia y Ucrania. La cifra habitual es de cerca de un caso por millón. La incidencia anual se calcula dividendo el número de casos anuales por el número de personas que residen en la zona considerada (fuente IPSN).*

(1)
M. Balonov, *in* S. Merwin y M. Balonov (eds.), *The Chernobyl Papers*, vol. 1, Doses to the Soviet population and early health effects studies, Research Entreprises, Washington DC, 1993.
(2)
J. Perera, *Nuclear Engineering International*, noviembre de 1995, p. 38.

y adultos en las zonas más fuertemente contaminadas de los tres países no muestran ningún aumento significativo de la incidencia de leucemias o de otros cánceres con respecto al periodo que precedió al accidente.[5,6] No hay correlación positiva entre la incidencia de leucemias y el grado de contaminación. Sin embargo, los límites metodológicos de estos estudios no permiten afirmar que no haya exceso de leucemias. Se puede pensar, que el aumento, de existir, debe ser moderado.

En cuanto a los efectos de la irradiación sobre el embarazo, los resultados disponibles proceden también de estudios epidemiológicos de tipo ecológico.[2,7] Estos resultados son contradictorios. Los estudios que sugieren un aumento de las malformaciones congénitas o del retraso mental en las zonas más contaminadas están mal descritos o presentan defectos metodológicos. No parecen haber tomado en consideración el hecho de que los aportes de vitaminas pueden verse afectados por las restricciones de alimentos impuestas por la contaminación de la cadena alimentaria. Ahora bien, en la embarazada, la carencia de una de ellas, el ácido fólico, está asociada a malformaciones del sistema nervioso central.

Las consecuencias psicológicas constituyen uno de los problemas sanitarios fundamentales para la población de las zonas contaminadas y para los *«liquidadores»*.[8] Se observan habitualmente tales consecuencias con ocasión de catástrofes tales como inundaciones y seísmos. Pero el hecho de vivir permanentemente en zonas contaminadas por radiaciones ionizantes puede provocar una expresión de estrés permanente y duradera. A pesar de todo, se han realizado pocos estudios epidemiológicos sobre el tema. Así pues, la naturaleza y la importancia de los trastornos en los distintos grupos de población son mal conocidas, lo cual constituye una dificultad indiscutible a la hora de establecer una estrategia de cuidado de las poblaciones implicadas.

En conclusión, está claro que hay aún importantes problemas de sanidad diez años después de la catástrofe, pero subsisten numerosas incógnitas. Muchos datos sanitarios han sido producidos en unas condiciones metodológicas de evaluación de riesgos que dificultan su interpretación. Los estudios epidemiológicos, por su parte, han sido iniciados tardíamente, a partir de comienzos de los años 1990. Efectos agudos han podido escapar a la observación. Los estudios en curso se interesan sobre todo por los cánceres y las malformaciones congénitas en los *«liquidadores»* y los residentes de las zonas más contaminadas. Pero estos estudios son de difícil realización. Pocos sistemas permiten seguir la evolución temporal de diversas patologías existentes antes del accidente en los países ribereños. Ahora bien, efectos tales como los cánceres solamente se manifiestan varios años después de la exposición y los excesos de incidencia con respecto a una situación normal son difíciles de poner de manifiesto cuando son débiles. Lo mismo que se ha tardado varias décadas en valorar las consecuencias sanitarias de los bombardeos de Hiroshima y Nagasaki, donde los estudios continúan, también habrá que investigar mucho todavía para evaluar con precisión las consecuencias del accidente de Chernóbil.

P.V. y D.B. ■

Para más información

■ D. Bard, P. Verger, P. Hubert, *Un bilan des conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl*, Instituto de protección y de seguridad nuclear, Fontenay-aux-Roses, febrero de 1996.

■ R. y B. Belbéoch, *Tchernobyl, une catastrophe*, ed. Allia, 1993.

(3) Stsjazhko *et al.*, *BMJ*, *310*, p. 25, 1995.

(4) B. Williams, *Nature*, *371*, 556, 1994.

(5) V. Ivanov *et al.*, *in* S. Nagataki (ed.), *Nagasaki Symposium on Chernobyl*: Update and Future, Elsevier, Amsterdam, 1994.

(6) A. Prisjazhniuk *et al.*, *Radiat. Environ. Biophys.*, *34*, 3, 1995.

(7) J. Little, *Pediat. Perinat. Epidemiol.*, *7*, 121, 1993.

(8) H. Ginzburg, E. Reis, *Public Health Reports*, *106*, 32, 1991.

LA VIDA SALVAJE EN CHERNÓBIL

Ronald Chesser y Robert Baker

Análisis de una fauna próspera pero genéticamente alterada

El estudio ecológico de las zonas contaminadas por el accidente de Chernóbil revela que la fauna abunda allí debido a la ausencia de población, que fue evacuada. Pero también se observan alteraciones genéticas significativas, cuyas consecuencias funcionales, poco aparentes, son desconocidas a largo plazo. Este tipo de estudios ilustra el desarrollo de una nueva disciplina, la *toxicología evolutiva*.

RONALD CHESSER es profesor del departamento de genética de la universidad de Georgia (Estados Unidos). Dirige también la división de ecología de la fauna y de toxicología del laboratorio de ecología de Savannah River.

ROBERT BAKER es profesor del departamento de ciencias biológicas de la universidad de Texas Tech y director del laboratorio de investigación en ciencias de la naturaleza.

Han transcurrido diez años desde que se produjera el peor accidente de una central nuclear, el del reactor nº 4 de Chernóbil, en Ucrania. La explosión y el fuego subsiguiente, que duró diez días, lanzaron entre 50 y 200 millones de curies de radiactividad al medio ambiente: unas diez veces más que en Hiroshima. Fueron evacuadas unas 135.000 personas en un radio de 30 km alrededor del reactor. La incidencia de cáncer de tiroides alcanzó niveles alarmantes en el norte de Ucrania y el sur de Bielorrusia.

Pero, ¿cuáles han sido las consecuencias propiamente ecológicas? ¿Se está produciendo el desastre predicho en las regiones contaminadas? Esta cuestión es objeto de un minucioso examen. Desde 1992, un año después del desmembramiento de la Unión Soviética, científicos del laboratorio de ecología y del departamento de toxicología de la universidad de Georgia (Estados Unidos) están estudiando la vida animal en la *«zona de exclusión»*, una zona de 30 km de radio en torno a la central (dentro de la cual se halla una zona de 10 km de radio todavía más severamente prohibida). En 1994, se incorporaron al equipo genetistas de la universidad de Texas Tech. Nuestros objetivos, definidos por el departamento americano de energía, consistían en determinar los impactos biológicos de la emisión masiva de radiaciones al medio, la extensión de los daños genéticos y el perfil de contaminación de los organismos que viven en las zonas más radiactivas (tipo y cantidad de los radionucleidos absorbidos). Hemos pasado varios meses estudiando sobre el terreno la zona de exclusión y los hábitats no contaminados más allá de la zona de 30 km. Pronto se puso de manifiesto que no podíamos separar los impactos sociológicos de las respuestas ecológicas: el cambio de ocupación humana había actuado sobre la ecología del medio.

Suele imputarse a fuertes dosis de radiación la alteración grave de los procesos vitales y la producción de monstruos genéticos. No obstante, nosotros no hemos observado ningún monstruo en las zonas contaminadas. Prospera y abunda allí una vida muy diversificada, incluso en las zonas más radiactivas. Los efectivos de ratones, corzos, osos, zorros, nutrias y lobos son más nutridos en los hábitats más contaminados que fuera de ellos.[1] Estas observaciones no atesti-

UN RADICAL OXÍGENO
es una molécula de oxígeno que posee un electrón no apareado. Esta entidad inestable provoca reacciones que atacan el DNA y las membranas de las células.

LOS GENES CONSERVADOS
son genes cuya secuencia difiere muy poco de una especie a otra.

UN TAXÓN
es un grupo de organismos (por ejemplo, género, especie, familia) cualquiera que sea su nivel en la jerarquía de la clasificación de los organismos vivientes.

(1)
R. Baker *et al.*, *Journal of mammalogy*, 77, 155, 1996.

guan una respuesta positiva a la irradiación, sino más bien la transformación de las tierras agrícolas o urbanizadas en tierras libres de seres humanos y por lo tanto favorables al desarrollo de poblaciones endémicas de plantas y animales. Así, los efectos negativos potenciales de la irradiación sobre las poblaciones de plantas y animales están contrarrestados por las influencias positivas de la retirada de más de 100.000 personas.

Debemos ir más lejos para determinar el efecto de los radionucleidos sobre los procesos vitales en la zona que rodea Chernóbil. Cuando las actividades humanas contaminan medios concretos con productos químicos distintos de los de los sistemas naturales pueden producirse alteraciones en las reacciones bioquímicas. Asimismo, las radiaciones gamma pueden producir radicales oxígeno* que rompen los enlaces hidrógeno del DNA, de débil energía, y separan las dos hélices de dicha molécula. Las partículas alfa y beta, aunque no poseen el poder de penetración de los rayos gamma, pueden provocar lesiones en las dos hélices del DNA. Cuando los daños son de escasa magnitud, y siempre que la célula no deje de dividirse, el DNA es rápidamente reparado. Al aumentar la dosis de radiación absorbida, la integridad de la molécula de DNA puede quedar alterada y la célula puede seguir siendo viable, aunque con funciones aberrantes. En tal caso, pueden modificarse el metabolismo celular y los procesos de desarrollo, especialmente si resultan afectados los gametos.



La evacuación de más de 100.000 habitantes en la región que rodea la central ha permitido el desarrollo de poblaciones de animales. (Foto R. Chesser.)

Disponemos de numerosas técnicas moleculares que permiten detectar las más ínfimas variaciones de la estructura del DNA (nuclear y mitocondrial) y determinar la secuencia de los nucleótidos de regiones codificadoras específicas o de segmentos no funcionales de las moléculas de DNA. Pero subsisten diversos problemas. En primer lugar, dado que la mayoría de los episodios de contaminación (como el de Chernóbil) no pueden preverse, raramente conocemos de antemano las características genéticas de las poblaciones afectadas. Debemos encontrar, pues, otra situación de referencia para deducir los cambios producidos por la contaminación.

En segundo lugar, no es posible determinar las secuencias de los DNA mitocondrial y nuclear, que constan de millones de nucleótidos. En consecuencia, debemos seleccionar segmentos representativos de los cambios debidos a la exposición a contaminantes que guarden relación con la biología de los organismos. En tercer lugar, debemos elegir muestras de poblaciones de tal modo que queden eliminadas las falsas tendencias inducidas por fenómenos distintos de la contaminación. Por ejemplo, suponiendo que el accidente matara todos los roedores en un radio de unos pocos kilómetros en torno al reactor y que las poblaciones que ahora se encuentran allí surgieran a raíz del desplazamiento de poblaciones vecinas, el aumento de población podría ser debido más a las variaciones pasadas que a los cambios radiactivos del medio.

Para estudiar el efecto de los productos tóxicos sobre el material genético, hemos empleado técnicas y métodos parecidos a los que se utilizan desde hace tiempo en las investigaciones sobre cambios evolutivos. Definimos nuestro método como una *Toxicología evolutiva* (*Evolutionnary toxicology*).

El proyecto experimental de los estudios de Chernóbil se organiza como un proceso en tres tiempos. En primer lugar, hemos seleccionado especies animales emparentadas con exigencias ecológicas similares. Estas especies, que deberían responder de la misma manera a la contaminación, tendrían que desempeñar el papel de experiencias independientes. Hemos estudiado dos especies diferentes, una dentro y la otra fuera de la zona contaminada.

En segundo lugar, para establecer las características genéticas de estos roedores antes del accidente, hemos seleccionado varias poblaciones lo más cercanas posibles a los hábitats contaminados, pero afectadas por una contaminación radiactiva muy débil. La evaluación de la variación genética dentro de las poblaciones testigo y entre ellas nos ha proporcionado los datos básicos acerca de los hábitats no contaminados. También hemos recogido especímenes en las poblaciones contaminadas siguiendo un esquema similar al escogido para las poblaciones testigo. Luego, hemos elegido el gen funcional *conservado** del citocromo b en el DNA mitocondrial. Este gen, que cuenta con 1.143 pares de bases, es lo bastante largo para que se puedan observar en él las mutaciones producidas. Al variar muy poco, incluso entre especies alejadas unas de otras, este gen garantiza la escasez de variaciones parásitas. Además, al tratarse de un gen que participa en la producción de energía dentro de la célula, es representativo del funcionamiento normal del organismo. Por último, dicho gen es mitocondrial y por lo tanto menos susceptible de ser reparado que un gen del DNA nuclear. En los mamíferos, las mitocondrias se heredan únicamente de las hembras; por lo tanto, todos los embriones poseen genes mitocondriales idénticos a los de su madre a menos que tenga lugar una mutación en los ovarios o durante el desarrollo precoz.

Se están produciendo unas alteraciones genéticas sin precedentes

A partir de estos criterios, podemos deducir los cambios sufridos por las poblaciones expuestas comparando el exceso de variaciones que presentan con respecto a las de animales testigo y por comparación de características entre las madres y sus fetos. Nuestro primer trabajo sobre las poblaciones de roedores expuestas a la irradiación de Chernóbil indican la presencia de alteraciones sin precedentes del gen del citocromo b. Además, observamos que los cambios continúan produciéndose, unos cambios que no pueden explicarse a partir de la variación geográfica o de accidentes de dispersión.

Cambios notables observados en todas las especies indican también que las alteraciones de secuencias no están limitadas a un taxón* particular. No obstante, por el momento no hay indicios de que el cambio molecular haya provocado algún funcionamiento defectuoso; los animales que poseen genes mutados parecen manifestar niveles de fertilidad y viabilidad normales. Todavía no sabemos si los cambios observados afectan otras porciones del genoma. Los progresos de la ciencia, pues, nos permiten examinar las interacciones complejas entre los contaminantes medioambientales y el material genético. Chernóbil ha sido un desastre de una amplitud monumental, pero la vida sigue prosperando, incluso en las regiones más contaminadas. La ciencia no debe dejar pasar las oportunidades ofrecidas por esta tragedia.

R.C. Y R.B. ■

POR UN PUÑADO DE ANTIÁTOMOS

Maurice Mashaal

Una decena de antiátomos: las primeras piedras del antimundo

MAURICE MASHAAL es periodista de *La Recherche*.

4 de enero de 1996, Ginebra: el anuncio de la fabricación de nueve átomos de antimateria hace resurgir antiguas preguntas. ¿Hay, en algún lugar de nuestro Universo, lejanas antigalaxias? Ambiciosos programas espaciales tratarán pronto de detectarlas. Mientras tanto, la exploración de esta fascinante simetría prosigue en el laboratorio.

Muchos medios de comunicación, habitualmente poco proclives a la ciencia fundamental, han dado una gran publicidad al anuncio del CERN*. Los amantes de la ciencia ficción han visto en él la materialización de sus sueños. Los inquietos han imaginado las terribles aplicaciones militares que podrían surgir de semejante hazaña científica. ¿Qué ha ocurrido en el gran Laboratorio europeo para la física de partículas?

El experimento, realizado el pasado otoño, es obra de un pequeño grupo de físicos alemanes e italianos dirigidos por Walter Oelert, del centro de investigaciones de Jülich (Alemania). La interpretación y la verificación de los datos, seguida de la aprobación de los pares, ha retrasado tres meses la publicación de los trabajos.[1]

El experimento demuestra por primera vez que es posible producir antiátomos de hidrógeno*. El protón y el electrón, constituyentes del átomo ordinario, están respectivamente sustituidos por un antiprotón (idéntico al protón pero de carga eléctrica opuesta, es decir, negativa) y un positrón (el antielectrón e^+, el equivalente positivo del electrón e^-).

El experimento requiere básicamente la presencia de un antiprotón y de un átomo normal. Al ser lanzado contra el átomo, el antiprotón interactúa con el núcleo positivamente cargado de éste, tras lo cual pierde un poco de energía y da lugar a veces a un par electrón-positrón. Si, por azar, el positrón es emitido en la misma dirección que el antiprotón y con la misma velocidad o casi, es posible la captura del positrón por el antiprotón, de donde la formación de un antiátomo (fig. 1).

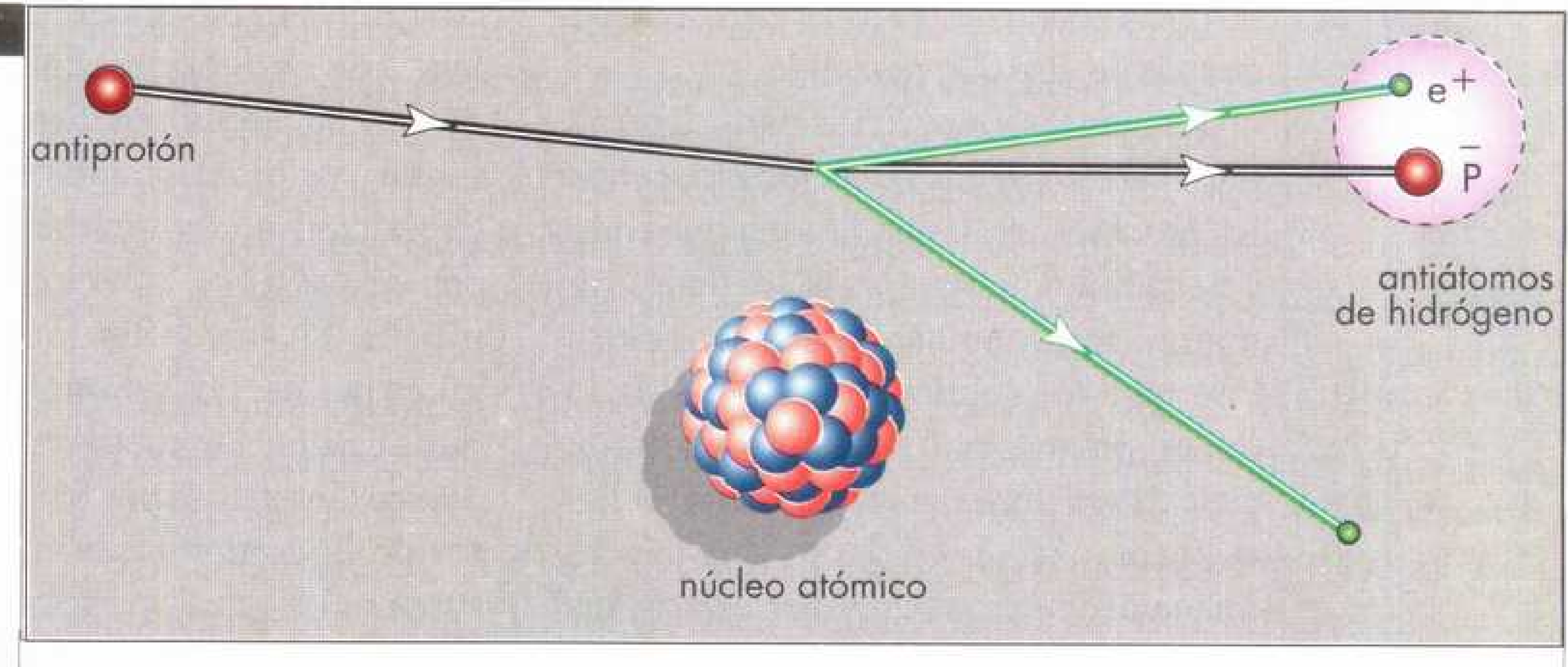


Figura 1. Principio de la obtención del antihidrógeno empleado en el CERN. Un antiprotón se acerca a un núcleo atómico. La interacción entre estas dos cargas eléctricas hace perder algo de energía al proyectil, una diferencia que puede materializarse en forma de un par electrón-positrón. Si el positrón es emitido en la misma dirección que el antiprotón y con una velocidad sensiblemente igual, puede ser capturado por el antiprotón para formar un antiátomo de hidrógeno.

Esta idea, relativamente simple, había sido propuesta hace muchos años. Pero nunca se había pensado realmente en llevarla a la práctica a causa de la pequeñísima probabilidad del suceso, una probabilidad calculada recientemente por el teórico Satn Brodsky del SLAC*.[2] Pero *«la construcción hacia 1980 de la fuente intensa de antiprotones del CERN, dentro del programa de descubrimiento de los bosones W y Z, significó un gran paso adelante que hizo posible la realización de la idea»*, recuerda Bernard D'Almagne, investigador del laboratorio del Acelerador lineal de Orsay. Además, cuanto mayor es el número de antiprotones disponibles, mayor es la probabilidad de que las interacciones esperadas se produzcan en número suficiente.

El experimento, realizado en el templo de la ciencia pesada, no requiere altas energías

El experimento germanoitaliano, relativamente ligero, tuvo por marco uno de los instrumentos del CERN: el LEAR (*Low Energy Antiproton Ring*), un anillo en forma de cuadrado de 20 m de lado y vértices redondeados.

Los antiprotones, producidos por la fuente intensa del CERN, circulan en él por paquetes de miles de millones a una velocidad aproximadamente igual a nueve décimas partes de la velocidad de la luz.

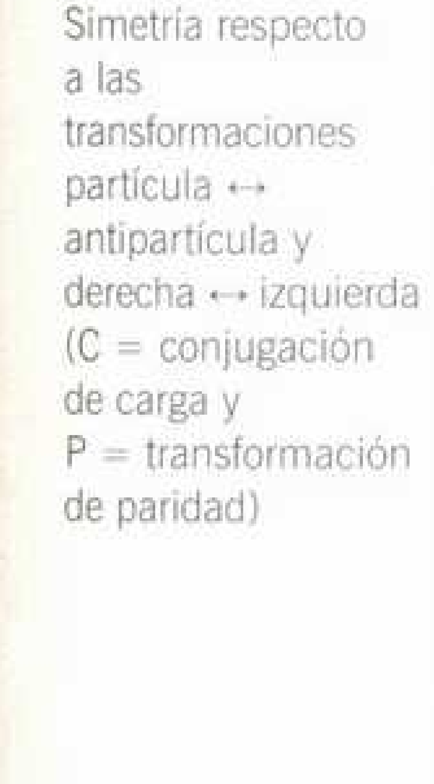
El grupo de Oelert decidió colocar un fino chorro de xenón a través del haz de antiprotones. La etapa es delicada, pues hay que evitar «contaminar» el vacío extremo por el que circula el haz. De la interacción entre los antiprotones proyectiles y los núcleos de xenón nacen algunos antiátomos. Estos últimos, al ser eléctricamente neutros, no son desviados por los imanes situados en los rincones del anillo y prosiguen su camino en línea recta. Luego, encuentran un detector formado por una sucesión de tres hojas de silicio. El positrón del antiátomo queda detenido y se aniquila con uno de los electrones del material atravesado, dando origen a dos fotones gamma que se emiten en direcciones opuestas: es la señal característica a identificar. El antiprotón, por su parte, sigue su camino y es detectado en otro dispositivo (fig. 2).

El experimento duró unas quince horas. Los detectores registraron once sucesos adecuados, de los cuales tal vez uno, dos o tres eran parásitos. En total, se obtuvieron unos nueve antiátomos de vida corta, puesto que su detección significaba su destrucción. Era poco en comparación con los billones de antiprotones puestos en juego, pero la cifra era perfectamente conforme a las previsiones teóricas. Ésta es la hazaña científica, que demuestra la posibilidad de construir elementos de un antimundo a

CERN
El actual *Laboratorio europeo para la física de partículas* ha conservado las iniciales de su antigua denominación (Consejo europeo para la investigación nuclear).

HIDRÓGENO
El átomo de hidrógeno es el más simple de los átomos. Se trata de un estado ligado electrón-protón, en el que el enlace corre a cargo de la interacción electromagnética.

SLAC
Stanford Linear Accelerator Center, de California.



TNT
Una tonelada de equivalente TNT es la energía que desprende la explosión de una tonelada de trinitrotolueno. Esta unidad vale unos 4.180 millones de joules.

SIMETRÍA CP
Simetría respecto a las transformaciones partícula ↔ antipartícula y derecha ↔ izquierda (C = conjugación de carga y P = transformación de paridad)

la manera de un juego de Lego. Dentro de poco, investigadores norteamericanos del Fermilab intentarán un experimento que debería producir varios miles de antiátomos.

¿Cuál es el objetivo de estos trabajos? Se impone un breve regreso a los años 1920. En aquella época, el teórico británico Paul A.M. Dirac trataba de integrar las leyes de la relatividad restringida de Einstein (pertinente para las velocidades próximas a la de la luz) a la jovencísima mecánica cuántica, de la que era uno de los fundadores. En 1928, Dirac halló una ecuación que, a partir de entonces, lleva su nombre. Esta ecuación describe muy bien el electrón y, entre otras ventajas, permite determinar con más finura que antes los niveles del energía del átomo de hidrógeno.

Pero la ecuación de Dirac planteaba un problema: la mitad de sus soluciones parecía corresponder a energías cinéticas negativas. ¿Qué significado cabía darles? En un primer momento, Dirac las despreció. Más tarde, las interpretó como el «reflejo» de unas partículas de igual masa que el electrón pero de carga eléctrica opuesta: los antielectrones, también llamados positrones. Estos gemelos positivos del electrón fueron descubiertos muy pronto por el norteamericano Carl D. Anderson, quien los detectó en 1932 entre las partículas producidas por el impacto de los rayos cósmicos sobre la atmósfera. El descubrimiento le valdría el premio Nobel cuatro años más tarde.

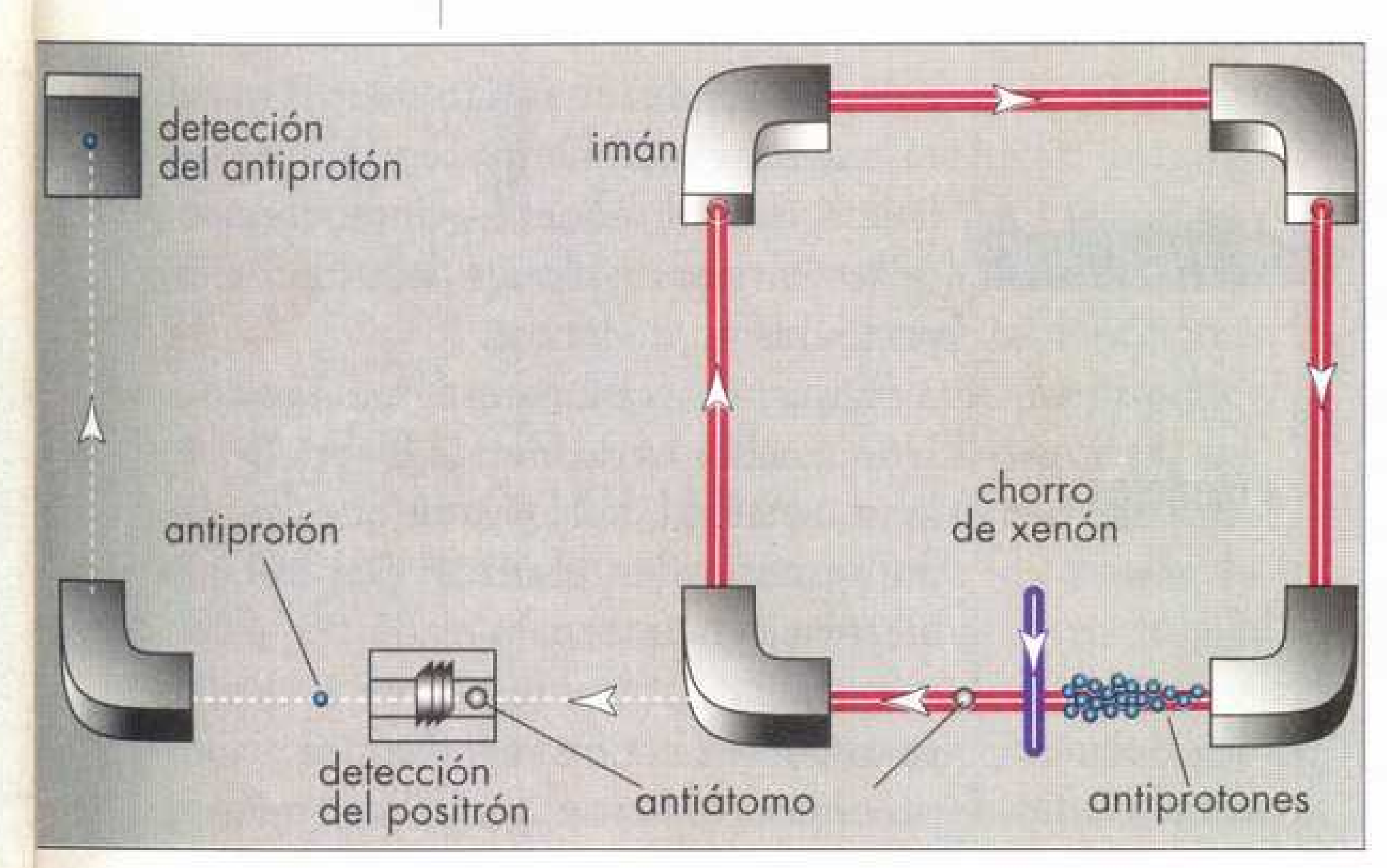


Figura 2. Por el anillo LEAR, del CERN, circula un haz de antiprotones (producidos bombardeando un blanco con protones, un método utilizado desde fines de los años 1950). El experimento realizado por Walter Oelert y su equipo ha consistido en interponer un fino chorro de xenón gaseoso. Cuando un antiprotón incide sobre un núcleo atómico, una de las reacciones posibles (de muy débil probabilidad) es la formación de un antiátomo de hidrógeno (véase fig. 1). Este antiátomo cede a un primer detector su positrón, tras lo cual el antiprotón atraviesa un segundo dispositivo. En quince horas de haz, se han detectado así nueve antiátomos.

El antiprotón, por su parte, fue hallado en 1955. Como se ve, la antimateria tiene ya una larga historia experimental... En realidad, el positrón y el antiprotón no eran sino los primeros ejemplos de una característica universal del mundo subatómico, una característica que se ha ido revelando progresivamente y que nunca ha sido desmentida: si existen partículas de carga $+q$, también puede existir sus antipartículas, de igual masa pero de carga opuesta $-q$.

¿A qué corresponde la noción de carga? La carga eléctrica nos es familiar por sus manifestaciones cotidianas. Pero una partícula posee en general otros tipos de carga, que se traducen en manifestaciones más sutiles. Los físicos de partículas veían que ciertas reacciones podían producirse; otras, en cambio, aunque permitidas por las leyes de la física (conservación de la energía, de la cantidad de movimiento, de la carga eléctrica, etc.), nunca eran observadas.

El análisis de lo que la naturaleza permite o prohíbe llevó a los especialistas a asignar a cada tipo de partícula un conjunto de números, positivos o negativos, de nombres bastante exóticos: «número bariónico», «número leptónico electrónico», etc. La carga eléctrica forma parte de la lista. Estos números se suman algebraicamente y, en principio, lo mismo que la carga eléctrica, se conservan durante las interacciones. Por ejemplo, la suma de los números bariónicos de un sistema de partículas permanece inalterada sea cual fuere el destino de estas últimas.

El origen profundo de estas «cargas» todavía no se ha dilucidado totalmente. Su conservación en las reacciones demuestra que derivan de simetrías abstractas. A decir verdad, dicha constatación no hace sino trasladar el misterio a estas últimas. En cualquier caso, recordemos que una partícula está caracterizada por diversos tipos de cargas y que *todas* las cargas de la correspondiente antipartícula son opuestas. Ello explica la existencia de un neutrón y un antineutrón, así como de un neutrino y un antineutrino, pese a que estas partículas son eléctricamente neutras. El fotón, cuyas cargas son todas nulas, se identifica con su propia antipartícula.

¿Qué ocurre cuando una partícula choca con su antipartícula? Se produce una pequeña explosión. El proceso, con mucho más probable (para las partículas más ligeras), es la aniquilación, es decir, la desaparición de estos dos objetos y la transformación de su energía en dos fotones (un solo fotón no permitiría que se conservara la cantidad de movimiento). Pero ésta no es la única posibilidad. También puede crearse un par neutrino-antineutrino, o, si la energía total es suficiente, un par protón-antiprotón, otro par de corpúsculos masivos, varios pares, etc. La única exigencia *a priori* es el respecto de las leyes de conservación.

De estas diferentes propiedades, el gran público ha retenido la más sensacional, la aniquilación. La masa y la energía iniciales se recuperan casi enteramente en forma de fotones, es decir, en forma de energía pura, puesto que los fotones carecen de masa. Las cifras son elocuentes: el choque de 1 kg de materia con 1 kg de antimateria desprendería una energía de $1{,}8.10^{17}$ joules, es decir, cerca de 40 megatoneladas de equivalente TNT*. ¿Espectacular? Claro, pero no hay que olvidar que bastarían unas cuarenta bombas termonucleares actuales para llegar al mismo resultado...

La existencia efímera de nueve antiátomos excita la imaginación y reabre la vieja caja de los fantasmas

Apenas anunciado, el éxito del CERN ha excitado la imaginación de la gente. ¿Es posible fabricar bombas de antimateria? En realidad, la idea ya es antigua y la síntesis de antiátomos no aporta nada al respecto. En efecto, ¿por qué molestarse en fabricar antiátomos de hidrógeno? Los antiprotones, que se obtienen mucho más fácilmente, tienen casi la misma masa y, al estar eléctricamente cargados, se prestan más fácilmente a la manipulación (por medio de campos eléctricos o magnéticos). Los antiprotones ya eran conocidos en tiempos de la guerra fría. De haber tenido algún interés militar, su investigación habría dispuesto de abundante financiación. Y no parece que tal fuera el caso... ¿Podría la fuente intensa del CERN reavivar los temores?

Como escribe Jean-Pierre Stroot, presidente de la fundación GIPRI (Geneva International Peace Research Institute): *«Las instalaciones del CERN permitirían producir, en funcionamiento continuo, un miligramo de antiprotones al cabo de varios siglos»*[3]. Por no hablar del coste financiero y del rendimiento energético... Además, no es fácil lograr un almacenamiento duradero en un recipiente, evitando el contacto entre antimateria y materia ordinaria. Por otra parte, las instalaciones anexas (campos magnéticos, enfriamiento, bomba, etc.) serían sin duda muy engorrosas...

FÍSICA

Se plantean dificultades parecidas ante la idea apenas más sensata de utilizar la antimateria como carburante compacto para naves espaciales de destino muy lejano. Tal vez esto sea posible dentro de un siglo. Se han ideado otras aplicaciones más o menos utópicas de la antimateria.(4) Pero no olvidemos que las antipartículas ya se utilizan habitualmente con fines muy pacíficos: la imaginología médica, por ejemplo, las usa rutinariamente en la tomografía por emisión de positrones.

La utilidad práctica de la antimateria es discutible, pero su interés fundamental es más inmediato. ¿En qué medida respeta la naturaleza la simetría partícula-antipartícula? Esta cuestión esconde, de hecho, varias problemáticas. La primera, la más notable a escala humana, es la ausencia de antimateria en nuestro mundo ordinario. Si la hubiera, no sería por mucho tiempo, pues se aniquilaría al entrar en contacto con la materia. Pero, ¿por qué no podría haber galaxias de antimateria muy alejadas conectadas con nosotros por fotones? Están en curso proyectos (dos de los cuales son misiones espaciales de la NASA, previstas para 1998 y 2001) para detectar un poco de antimateria eventualmente escapada de estas hipotéticas antigalaxias.

Es posible que el estudio del comportamiento de los antineutrones modifique los modelos del big bang

En realidad, la asimetría observada en el Universo constituye un enigma. No está claro por qué las partículas y las antipartículas fueron creadas en proporciones desiguales en el big bang. Y si las proporciones fueron iguales al principio, ¿por qué han dejado de serlo?

Tal vez la solución al problema vendrá del estudio fino de las simetrías respetadas o no por las cuatro interacciones fundamentales (electromagnética, débil, fuerte y gravitacional). La atención, actualmente, se centra en la interacción débil. Se sabe, desde 1957, que las partículas y las antipartículas no se comportan exactamente igual frente a esta interacción. Además, experimentos realizados en 1964 por J.H. Christenson, J.W. Cronin, V.L. Fitch y R. Turlay, en Estados Unidos, demostraron que la interacción débil viola incluso la llamada simetría CP* en la desintegración espontánea de los mesones K.(I) *«Pero la violación de esta simetría*, precisa Pierre Fayet, teórico de Escuela normal superior (París), *es una de las condiciones necesarias, determinadas por Andrei Sajárov hacia 1966, para que, con el tiempo, haya aparecido en el Universo un exceso de materia con respecto a la antimateria.»*

La simetría CP, o más bien su violación, mal conocida cuantitativamente, constituye una de pocas zonas de sombra del famoso «modelo estándar» de las partículas y sus interacciones. No es de extrañar, pues, que este fenómeno movilice programas de investigación ambiciosos, como el del colisionador e^+e^- en construcción, en Stanford (California). Dicho colisionador suministrará gran abundancia de mesones B; a principios de los años 2000, se estudiarán las desintegraciones de estas partículas por medio de un sofisticado detector llamado BABAR, también en construcción.

En lo tocante a las simetrías, la fabricación de antiátomos de hidrógeno abre algunas puertas; se podría intentar comprobar, por ejemplo, si los niveles de energía de los antiátomos de hidrógeno son exactamente los mismos que los de los átomos de hidrógeno usuales, o si estos objetos caen a la misma velocidad bajo la acción de la gravedad. La menor diferencia constituiría una verdadera sorpresa y pondría muchas cosas en entredicho. Éste es, sin duda, el principal interés de los antiátomos. Pero para realizar experimentos en tal sentido, habría que disponer —duraderamente— de varios millones de antiátomos, preferiblemente lentos.

Distintos equipos esperan lograrlo. Uno de ellos es de Gerald Gabrielse, de la universidad de Harvard, que captura antiprotones (en el CERN) con trampas electromagnéticas para medir con precisión su masa.(II) Gabrielse, por lo demás, se dispone a confinar positrones y antiprotones, primera etapa de otro método de fabricación de antiátomos.

En el CERN, el estudio de la antimateria podría extenderse a los átomos de helio, donde uno de los electrones sería sustituido por un antiprotón. ¿Contribuirá a la concreción de estos proyectos el eco del experimento del grupo de Oelert? Ante todo, será preciso que el laboratorio europeo conserve y modifique la fuente intensa de antiprotones que alimenta el LEAR. La suerte del anillo «shakespeariano», en cambio, ya está echada; este anillo dejará de funcionar a fin de año. El CERN, en efecto, debe concentrar sus esfuerzos en su futuro gran acelerador LHC. Como destaca Bernarde d'Almagne: *«Los objetivos científicos del LHC van mucho más allá de los antiátomos»*. Hay descubrimientos más urgentes que otros, aunque la necesidad de elegir sea a veces dolorosa.

M.M. ■

Mundo científico ha publicado:
(I) «El tiempo en física», febrero de 1994.
(II) «El protón se parece mucho a su doble», octubre de 1995, p. 718.

(1) G. Baur *et al.*, *Physics Letters B*, 368, 251, 1996.
(2) C.T. Munger *et al.*, *Hyperfine Interactions*, 76, 175, 1993; C.T. Munger *et al.*, *Phys. Rev. D*, 49, 3228, 1994.
(3) Comunicado de la fundación GIPRI, 15 de enero de 1996.
(4) Para dar rienda suelta a la imaginación, véase por ejemplo R. Forward y J. Davis, *Les Mystères de l'antimatière*, Éditions du Rocher, 1991.

Peter Isakson

HACIA NUEVOS ANTIINFLAMATORIOS

Reproducir los beneficios de la aspirina sin sus inconvenientes

PETER ISAKSON es director de las investigaciones sobre enfermedades inflamatorias en Searle Research and Development, en Saint Louis (Missouri).

Este artículo corresponde en parte a una conferencia preparada por las «Institut Pasteur EurW Conférences», dedicadas, los días 18 y 19 de abril al tema «Nuevas fosfolipasas y ciclo-oxigenasas: objetivos de los medicamentos del futuro». Lugar: Centre d'information scientifique, Institut Pasteur, París.

AINS los antiinflamatorios más potentes son unas hormonas esteroides, los glucocorticoides, como la cortisona, la dexametasona o la fluocinolona. Sin embargo, como estas hormonas producen bastantes efectos indeseables (toxicidad digestiva, perturbaciones del metabolismo, inmunodepresión, etc.), a veces se prefieren los antiinflamatorios no esteroides (AINS), como la aspirina.

Hace casi cien años, la aspirina, o ácido acetilsalicílico, se comercializó en Alemania con un éxito excepcional. La aspirina es una referencia en la lucha contra la inflamación y ciertos dolores. Pero, utilizada de manera continua, es relativamente tóxica para el sistema digestivo y el riñón. Su mecanismo de acción molecular ha puesto a los investigadores sobre la pista de nuevos antiinflamatorios que no tienen estos efectos indeseables

La aspirina y los otros antiinflamatorios no esteroides (AINS)* se han utilizado para tratar numerosas enfermedades desde hace casi cien años, especialmente las afecciones reumáticas.[1] Estos medicamentos tienen actividades antiinflamatorias, antálgicas y combaten la fiebre. Ampliamente empleados para disminuir la infla-mación crónica[II] que caracteriza la poliartritis (inflamación de las membranas sinoviales de las articulaciones) y la artrosis (destrucción de los cartílagos articulares), alivian también ciertos dolores, como el de cabeza o el de muelas.

La mayoría de los datos sugieren que la aspirina y los demás AINS disponibles tienen una eficacia prácticamente equivalente, aunque la dosis necesaria varía bastante según cada producto. Sin embargo, todos tienen molestos efectos secundarios. Se trata, ante todo, de desarreglos y dolores gastrointestinales y, a veces, formación de una úlcera (deterioro de la mucosa intestinal) en más del 25 % de los pacientes, quienes pueden padecer incluso hemorragias, mortales en casos raros.[1] La aspirina es mal tolerada por muchas personas cuando la consumen de manera crónica. Estos efectos secundarios no se deben solamente a una acción directa sobre la mucosa digestiva: también pueden producirse hemorragias y úlceras cuando el medicamento se administra por vía rectal o intravenosa. También se han observado problemas al nivel del riñón y del sistema nervioso central. Finalmente, la aspirina reduce la función de las plaquetas sanguíneas y la formación de tromboxano A_2,* efecto que se ha explotado ampliamente para la prevención de las enfermedades cardiovasculares (fig. 1). Debido a la toxicidad, sobre todo digestiva, de la aspirina y de los productos

Figura 1. **He aquí las dos vías bioquímicas** *que llevan del ácido araquidónico a las prostaglandinas y al tromboxano A_2. La aspirina bloquea estas dos vías actuando sobre un enzima clave, la ciclo-oxigenasa (COX).*

semejantes, la industria farmacéutica está tratando de poner a punto medicamentos que posean las virtudes de los AINS, pero ninguno de sus inconvenientes. Aunque el éxito de esta tentativa se está haciendo esperar, recientemente se ha encontrado una pista importante, cuya confirmación se espera para antes del año 2000.

En 1971, unos investigadores londinenses; John Vane, Bryan Smith y Anthony Willis, propusieron un mecanismo bioquímico que explicaba la acción de los AINS. Comprobaron que estas sustancias impedían la producción de las prostaglandinas* (PG), inhibiendo la prostaglandina-sintetasa o ciclo-oxigenasa (COX). La COX es un enzima de doble función: cataliza la conversión de un ácido graso esencial, el ácido araquidónico, en prostaglandinas intermedias (PGH_2 y PGG_2), que, a su vez, se transforman en prostaglandinas activas (fig. 1).[2]

PROSTAGLANDINAS hormonas inicialmente aisladas en 1935 por el sueco Ulf von Euler (premio Nobel de medicina 1970) en el líquido seminal y la próstata. Derivan del ácido araquidónico (ácidos grasos con 20 átomos de carbono). Se designan con las letras A, B, E, F, G, H o I, según la fórmula del núcleo químico principal, y por el índice 1, 2 o 3, según su número de enlaces dobles.

Ácido araquidónico

En el estómago, estas hormonas protegen la mucosa; en el riñón, participan probablemente en el mantenimiento del flujo sanguíneo. Pero algunas, especialmente la PGE_2 y la PGI_2 (prostaciclina), activan la inflamación (estimulando la dilatación de los vasos sanguíneos) y contribuyen a la aparición del dolor. Se comprende, pues, por qué la inhibición global de la producción de las prostaglandinas por los AINS tiene un efecto antiinflamatorio, aunque provocando, paralelamente, daños digestivos y renales.

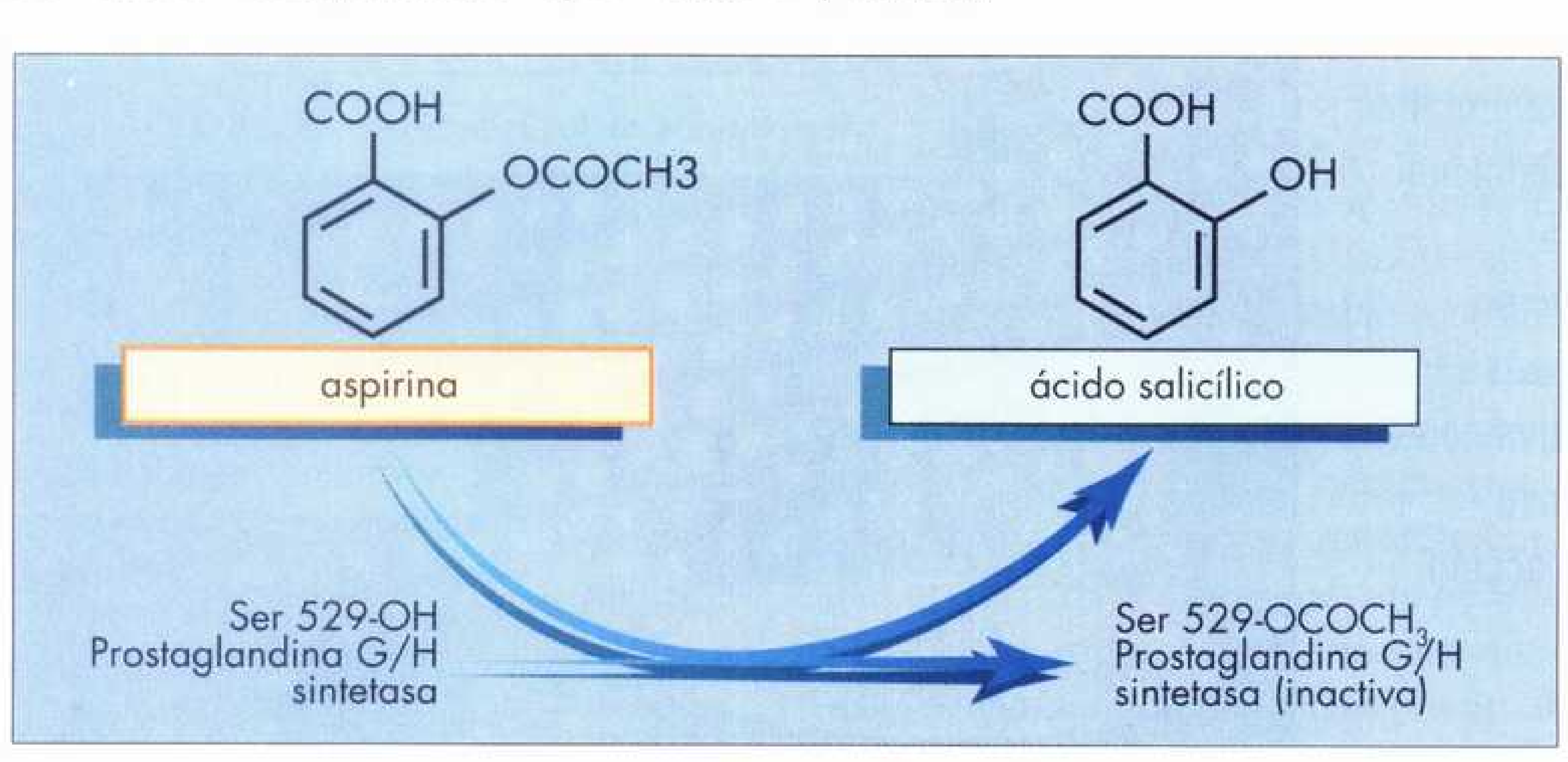


Figura 2. El modo de acción de la aspirina. En contacto con la ciclo-oxigenasa, libera espontáneamente su grupo acetato (CH_3COO^-). Éste se fija sobre un aminoácido del enzima, la serina (en la posición 529 de la cadena polipeptídica), lo que tiene como consecuencia la inactivación del enzima.

ÁCIDO ARAQUIDÓNICO
COX-1 (constitutiva)
COX-2 (inducible)
AINS aspirina
glucocorticoides
estómago
intestino
riñón
plaquetas sanguíneas
puntos de inflamación:
-macrófagos
-células
de las membranas sinoviales

Figura 3. Existen dos formas de ciclo-oxigenasas: la COX-1 y la COX-2. Parece que sólo los inhibidores de la COX-2 conservan el poder antiinflamatorio y antálgico de la aspirina y, en cambio, no producen ningún daño gastrointestinal.

PLAQUETAS SANGUÍNEAS células sin núcleo que desempeñan un papel primordial en la contención de las hemorragias (hemostasis primaria) y en la coagulación del plasma.

Durante años, se ha pensado que la inhibición del enzima COX reduciría no solamente las prostaglandinas indeseables en el tejido inflamado, sino también las benéficas en el estómago, el riñón y otros órganos. Pero en 1991, los equipos de Dan Simmons y de Harvey Herschman, de Provo (Utah) y Los Ángeles, identificaron dos formas distintas del enzima:[3,4] una «forma constitutiva» (COX-1), presente en cantidades constantes en la mayoría de tejidos (intestino, riñón, etc.) y que activa la producción de las prostaglandinas necesarias para el funcionamiento fisiológico normal, y una «forma inducible» (COX-2),* cuya fabricación sólo se produce durante una inflamación.

Después de su descubrimiento, las dos formas de ciclo-oxigenasa fueron aisladas en varias especies, entre ellas los roedores y el hombre. Ambas formas poseen propiedades enzimáticas similares[5] y también ambas son modificadas (acetiladas) por la aspirina (ácido acetilsalicílico), un mecanismo único entre los AINS (fig. 2). En el caso de la COX-1, este cambio químico evita la peroxidación del ácido araquidónico y la formación de las prostaglandinas intermedias (PGH_2 y PGG_2), previa a la síntesis de las prostaglandinas, mientras que la aspirina no produce este efecto cuando modifica la COX-2. Esto sugiere que los puntos activos de los dos enzimas son diferentes.

Desde el descubrimiento de la forma inducible de la ciclo-oxigenasa (COX-2) en 1991, innumerables investigaciones experimentales han intentado comprender sus funciones fisiológicas y su implicación en diversas patologías. Mientras que la COX-1 se produce de manera invariable («constitutiva») en la mayor parte de las células y los tejidos, la COX-2 no existe en los órganos en condiciones normales, excepto en ciertas zonas de la corteza cerebral de la rata y en una región específica del túbulo renal (la *macula densa*), donde su función nos es desconocida.

En los otros órganos, ciertos estímulos inflamatorios, entre ellos unas citoquinas* y unas toxinas bacterianas, son los que inducen la producción de COX-2, en particular en el punto de una inflamación aguda[6,8] o en la artritis que se puede inducir en la rata.[9] En las células en cultivo y en el animal, la producción de COX-2 puede bloquearse con glucocorticoides de síntesis como la dexametasona, un antiinflamatorio mucho más potente que la cortisona. De ahí, la idea de la acción antiinflamatoria de los glucocorticoides pueda explicarse parcialmente por la inhibición de la síntesis de las prostaglandinas dependiente de la COX-2 (fig. 3). En resumen, actualmente resulta evidente que el aumento de la expresión de COX-2 es una de las claves que conducen a ciertos síntomas de la inflamación.

Los inhibidores específicos de la COX-2 no disminuyen la producción de prostaglandinas y no producen ninguna lesión gástrica

Nuestra hipótesis es que la actividad de la COX-1 protege el estómago y el intestino, y que la aspirina y los otros AINS actuales, al inhibirla, hace que estas sustancias resulten tóxicas para el aparato digestivo. El reparto tisular del enzima apoya este punto de vista, porque en el tracto digestivo sólo se produce la COX-1. En 1994, comprobamos esta hipótesis evaluando la producción estomacal de prostaglandinas y la formación de úlceras. Unas ratas ingirieron sustancias que también actuaban contra otros objetivos que no eran las COX, como la aspirina y la indometacina, o bien inhibidores específicos de la COX-2.[6,7] Apareció una estrecha correlación entre la reducción de las tasas estomacales de prostaglandinas por los primeros inhibidores (no específicos de las COX) y la aparición de lesiones gastrointestinales. Por el contrario, los inhibidores específicos de la COX-2 no tuvieron ningún efecto sobre la producción gástrica de prostaglandinas y no causaron ninguna lesión, incluso a dosis muy

TROMBOXANOS (A Y B)
(de *thrombos*, coágulo y *xenos*, extraño): derivados del ácido araquidónico y de las prostaglandinas intermedias (PGH_2 y PGG_2). Estimulan la agregación plaquetaria, la vasoconstricción y la broncodilatación.

COX-1 Y 2
En una especie determinada, los genes que codifican la COX-1 y la COX-2 son similares en el 60 %. La mayor parte de sus diferencias se encuentran en los extremos de los enzimas. Su región central, en cambio, es casi idéntica, lo que sugiere que desempeña una función especial en la interacción con otros factores.

CITOQUINAS
mediadores celulares producidos como respuesta a una agresión del sistema inmunitario.

elevadas. Por tanto, nuestra hipótesis se verificó: la COX-1 es responsable de la producción de prostaglandinas que tienen una función protectora del aparato gastrointestinal.

Durante los últimos cinco años, los investigadores han evaluado la capacidad de una amplia gama de productos, entre ellos los AINS existentes en el mercado, para inhibir *in vitro* los enzimas COX. El problema es que casi todos los estudios han demostrado que los AINS que se comercializan inhiben las dos formas de COX a concentraciones casi equivalentes. Algunos de ellos, como la aspirina o la indometacina, se muestran más potentes contra la COX-1 que contra la COX-2 (inhiben la primera a una dosis menor de lo que exige la segunda). En cambio, varios compuestos experimentales se han mostrado más de cien veces más activos contra la COX-2 que contra la COX-1. Éste es el caso del DUP-697, del NS-398, del flosulido y de otros productos sintetizados en Estados Unidos, Japón, Suiza y Canadá por las firmas Searle, Taisho, Ciba-Geigy y Merk-Frosst, por ejemplo. Su eficacia y su toxicidad se han comprobado en modelos animales de la inflamación y del dolor, ya utilizados para estudiar los efectos de los AINS que hay en el mercado. Los primeros resultados confirman su interés: aunque conservan la acción antiinflamatoria y antálgica de los AINS, no producen ningún daño gastrointestinal.

Así pues, parece que el descubrimiento, hace cinco años, de la forma inducible de la ciclo-oxigenasa nos conducirá a nuevos medicamentos que pronto podrían reemplazar a los AINS. Sólo hay que esperar a que los actuales ensayos clínicos confirmen estas promesas.

P.I. ■

(1)
M.C. Allison *et al.*, *N. Engl. J. Med.*, *327*, 749, 1992.
(2)
D. DeWitt, *Biochim. Biophys. Acta*, *1083*, 121, 1991.
(3)
W. Xie *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci.* USA, 88, 2692, 1991.
(4)
D.A. Kujubu *et al.*, *J. Biol. Chem.*, *266*, 12866, 1991.
(5)
J.K. Gierse *et al.*, *Biochem. J.*, *305*, 479, 1995.
(6)
J.L. Masferrer *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci.* USA, 91, 3228, 1994.
(7)
K. Seibert *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci.* USA, *91*, 12013, 1994.
(8)
J.L. Crofford *et al.*, *J. Clin. Invest.*, *93*, 1095, 1994.
(9)
G. Anderson *et al.*, *J. Clin. Invest.*, en prensa, 1996.
Mundo científico ha publicado:
(I)
«La aspirina», enero, 1987.
(II)
«La reacción inflamatoria: una defensa agresiva», julio, 1986.

Para más información

Generalistas
■ Exposición «Aspirine, un comprimé de chimie», Palais de la Découverte, París.
■ L.F. Perrin, P.E. Laurent, *L'Aspirine*, Ellipses, París, 1991
Acción sobre las COX
■ J. Verne, «Towards a better aspirin», *Nature*, *367*, 215, 1994.
■ P. Isakson *et al.*, «Discovery of a better aspirin», *Adv. Prostaglandin. Thromboxane Leukot Res.*, *23*, 49, 1995.
■ P.J. Loll et al., «The structural basis of aspirin activity inferred from the crystal structure of inactived prostaglandin H2 synthase» *Nat. Struct. Biol.*, *2*, 637, 1995
Efecto analgésico
■ B. Bannawarth *et al. Fundam. Clin. Pharmacol*, 9, 1, 1995.

JÚPITER
LA HORA DE LA VERDAD

Jean-Marc Huré

Galileo, primer balance de un experimento histórico

JEAN-MARC HURÉ,
Observatorio de París-Meudon.

Por primera vez, una sonda ha penetrado en la atmósfera de un planeta gigante. Todavía no ha terminado la transmisión de datos y ya se acumulan las preguntas... ¿Qué ha hecho Júpiter con su agua? ¿Por qué hay intensos vientos atmósfera adentro? ¿Hay que revisar la estructura de Júpiter?

El 18 de octubre de 1989, la lanzadera espacial norteamericana Atlantis dejaba el suelo de Florida llevando a bordo la sonda Galileo, construida por el Jet Propulsion Laboratory (JPL) de Pasadena. Las esperanzas que planetólogos y astrofísicos depositaban en Galileo estaban a la altura del coste del proyecto: 1.400 millones de dólares.

Después de haber visitado Venus en febrero de 1990,[I] rozado el asteroide Gaspra en octubre de 1991, y luego Ida y su luna en 1993,[II] y haber asistido a la colisión del cometa Schoemaker-Levy-9 con Júpiter en julio de 1994, Galileo llegaba un año más tarde a las cercanías de este planeta gigante. El 13 de julio de 1995, cuando Júpiter ya sólo estaba a 82 millones de kilómetros, Galileo lanzó una pequeña cápsula de 340 kg. Ocho instrumentos se aprestaban a sondear, por primera vez en la historia de la astronomía, la atmósfera de un planeta gaseoso. Progresivamente acelerada por el campo gravitatorio de Júpiter, la cápsula alcanzaba su objetivo, el 7 de diciembre de 1995 a las 23h 10 GMT, a una velocidad de 170.000 km/h. Durante casi una hora, analizó las propiedades químicas y dinámicas de la alta atmósfera joviana y transmitió el resultado de sus mediciones al ordenador de Galileo, en órbita unos 210.000 km más arriba.

Los primeros resultados se presentaron oficialmente el pasado 22 de enero.[1] Los investigadores han empezado a descifrar y calibrar los datos, un trabajo que requerirá aún varios meses. Pero algunos de ellos ya confirman lo que mostraron las misiones Voyager, mientras que otros han sido recibidos con gran sorpresa y los planetólogos se ven obligados a replantear en parte sus modelos. Los responsables del proyecto han sido rotundos: un éxito total, han anunciado. Sin embargo el dircurso se tiñe de una nota de amargura cuando se sabe que el paracaídas, que tenía que frenar drásticamente la carrera de la cápsula durante su descenso, se desplegó 53 segundos más tarde.[2] ¡Y que la cápsula no analizó los primeros kilómetros de atmósfera! Pese al escudo térmico, algunos instrumentos de medida alcanzaron rápidamente temperaturas excesivas.[3] El experimento sólo duró 58 minutos frente a los 75 inicialmente previstos. La cápsula enmudeció a 160 km de profundidad (22 bar de presión). Un alcance ínfimo cuando se compara esta cifra con el radio del planeta (71.400 km). Pero la cosecha de resultados es rica... y tiene algunas sorpresas.

A 50.000 km de altura, la cápsula Galileo atravesó un cinturón de radiación hasta entonces desconocido

La primera llegó tres horas antes de la entrada en la atmósfera de Júpiter. Poco después de haber pasado el anillo de polvo que se extiende entre 57.000 y 51.000 km, la cápsula entró en un cinturón de radiación desconocido hasta entonces: a unos 50.000 km de altura, los instrumentos detectaron iones de helio muy rápidos. Aceleradas por efecto del campo magnético de Júpiter, estas partículas emiten una potente radiación radio. ¿De dónde proceden? ¿Interceptan sus trayectorias el anillo vecino? ¿Es sensible el polvo de este anillo a la radiación emitida? Una nueva modelización de la magnetosfera de Júpiter tendrá que aportar respuestas a estas preguntas.[3]

La segunda sorpresa concierne a la composición de la atmósfera. Se esperaba que la cápsula cruzase primero nubes de amoniaco (NH_3), luego nubes de hidrogenosulfuro de amonio (NH_4SH) y, finalmente, una capa con vapor de agua y cristales de hielo mezclados. Nada de esto. En su lugar una atmósfera más bien transparente, desprovista de nubes de altura y particularmente seca. Las medidas realizadas desde la Tierra en las longitudes de onda infrarrojas demostraron que de hecho la cápsula se había introducido en uno de los numerosos puntos calientes que jalonan el ecuador. ¡Pero solamente el 1 % de la superficie del globo presenta esta característica![4] En consecuencia, muchos resultados han resultado un tanto sesgados. Probablemente éste es el caso de la medida de la abundancia de oxígeno, un elemento que se encuentra presente fundamentalmente en forma de agua. Las sondas Voyager-1 y Voyager-2, que pasaron en marzo y en julio de 1979 respectivamente, habían sugerido una abundancia doble respecto a la abundancia solar, donde hay unos ocho átomos de oxígeno por cada diez mil átomos de hidrógeno. Más tarde, los análisis de la propagación de las ondas engendradas por el impacto del cometa Shoemaker-Levy-9 hacían pensar en una abundancia diez veces la solar. Aunque este último valor parece excesivo, Galileo ha introducido la duda: ¡la abundancia en oxígeno sería exactamente la solar! ¿Cómo dar cuenta de esta deficiencia de oxígeno respecto a las observaciones precedentes? La explicación más sencilla consiste en tomar nota del hecho de que la cápsula se dirigió hacia una región «árida»: encontró menos agua, y por lo tanto menos oxígeno...

El espectrómetro de masas ha aportado su lote de novedades: ha detectado azufre, en forma de sulfuro de hidrógeno (H_2S), y algunos gases nobles (argón, neón, criptón y xenón) en unas proporciones inesperadas. El criptón y el xenón están en exceso respecto a las previsiones: en cambio el neón, en menor cantidad. En cuanto al sulfuro de hidrógeno, su presencia plantea problemas. Combinada con el amoniaco, se creía que esta molécula tenía que producir NH_4SH. Pero este último compuesto no se ha observado... ¿En qué medida tiene lugar esta reacción química?

La cápsula ha encontrado vientos violentos que soplaban de este a oeste a 550 km/h. En altura estaba previsto. La estructura turbulenta de las bandas nubosas coloreadas de Júpiter sugiere, en efecto, una alta atmósfera particularmente atormentada. Pero en profundidad, allí donde ya no llega la luz solar, las corrientes aéreas resultan ser tan enérgicas como en la superficie. De hecho, esta persistencia de los vientos apoya la idea de que no todos los movimientos atmosféricos se generan debido a los gradientes de temperatura provocados por el



Como confirma Galileo, el motor principal de los movimientos de la atmósfera de Júpiter no es el flujo de energía solar: es el resultado de un lento goteo de helio hasta el núcleo del planeta. (Foto Nasa/Ciel et Espace.)

calentamiento solar. En un caso típico, Venus, el flujo solar mezcla a gran escala las zonas polares y ecuatoriales. En cambio, en Júpiter, parece que el motor principal es un flujo de energía procedente del interior. En efecto, en 1969 se comprobó, a partir de observaciones en las longitudes de onda infrarrojas, que Júpiter irradia aproximadamente 1,7 veces más energía al espacio que la que recibe del Sol (Saturno, Urano y Neptuno presentan una anomalía similar). Durante mucho tiempo se pensó que el planeta proseguía su lenta contracción gravitatoria desde la época de su formación, hace 4.500 millones de años: según esta hipótesis, la contracción se tendría que saldar con un desprendimiento de calor. Pero modelos recientes, establecidos por investigadores franceses, indican que Júpiter, como Saturno, tiene que haberse enfriado desde hace al menos 500 millones de años.(5)

De hecho, para encontrar la causa de la fuente de energía interna hay que seguir la pista del helio. Como explicaba el profesor Tobias Owen del Instituto de Astrofísica de Hawai en una conferencia dada en el Observatorio de Meudon el pasado 9 de febrero, el helio tiene que estar presente en Júpiter en las mismas proporciones que en la nebulosa primitiva de la que surgieron el Sol y los planetas. Pero Galileo ha confirmado las medidas de los Voyager: el helio presenta una deficiencia del 50 % en la atmósfera de Júpiter. Pero esto sólo es una apariencia. Ya que, por efecto de la alta presión, este elemento se ha condensado en parte en pequeñas gotitas antes de fluir lentamente hacia el centro de Júpiter. Esta caída en el interior de un medio altamente viscoso va acompañada de una disipación de energía, lo que resuelve el problema planteado en 1969. La deficiencia observada en la abundancia de neón estaría asociada a la anterior: probablemente disuelto en el helio, este elemento también habría descendido a las profundidades. De esta experiencia, los científicos sacan también una enseñanza sobre la génesis del planeta. Se invocan dos escenarios. En el primero, la formación de Júpiter es comparable, por su mecanismo, a la de una estrella: condensación en una sola etapa a partir de un material idéntico al que constituyó nuestro Sol. En el segundo escenario, se constituyó primero un pequeño «núcleo», una decena de veces más masivo que la Tierra, compuesto de hielos y materiales refractarios. Inició una fase de desgasificación y, progresivamente, acretó material de la nebulosa, así como algunos meteoritos y cometas. Al final de esta etapa, la atmósfera estaba enriquecida en carbono respecto al contenido inicial de la nebulosa protosolar. El contenido en carbono (en forma de metano) medido por Galileo, aunque ligeramente inferior a las estimaciones de las sondas Voyager, aboga en favor de esta hipótesis: *My carbon is rich*.

Finalmente, los astrofísicos esperan con impaciencia que el desciframiento de los datos proporcione una estimación precisa de la cantidad de deuterio (el isótopo pesado del hidrógeno) en Júpiter. En efecto, desde su formación, el planeta no ha destruido su deuterio, a diferencia del Sol que lo consumió muy pronto antes de que se iniciase la combustión del hidrógeno. Y, para estimar la cantidad de deuterio en la nebulosa primitiva, los astrónomos sólo disponían hasta ahora de medidas indirectas, teñidas de incertidumbres. Al proporcionar una información más directa, los datos de Galileo darán acceso a la abundancia de deuterio en la Galaxia, allí donde nació nuestro sistema solar. De este modo se espera conocer mejor la síntesis de los elementos en el universo primordial.

Galileo, cuyos preparativos se remontan casi a la fecha en que el hombre puso el pie en la Luna, ya no tiene nada que envidiar a los Viking, Mariner y Voyager. Los descubrimientos que ha proporcionado desde su lanzamiento son notables. Y todavía quedan dos años en perspectiva durante los cuales la sonda justificará plenamente su nombre al acercarse a los satélites descubiertos en 1610 por Galileo. Dado que la antena de transmisión y el sistema registrador han acusado algunos signos de debilidad,(6) los científicos no dispondrán del conjunto de los datos antes del verano.

J.-M.H. ■

Mundo Científico ha publicado:

(I)
«La atmósfera profunda de Venus», nº 148, julio-agosto, 1994.
(II)
«Galileo descubre la luna de Ida», nº 149, septiembre, 1994, pág. 703.
(1)
D.J. Stevenson, *Nature*, 379, 495, 1996.
(2)
Aviation week and Space Technology, 22, 19 de enero, 1996.
(3)
Aviation week and Space Technology, 32, 29 de enero, 1996.
(4)
R.A. Kerr, *Science*, 271, 593, 1996.
(5)
T. Guillot *et al.*, *Ap. J.*, 450, 463, 1995.
(6)
Ciel et Espace, 28, febrero, 1996.

NOVEDADES SOBRE LA ENFERMEDAD DE CHAGAS

Laure Schalchli

Un parásito transmitido por una chinche podría atacar por mimetismo molecular

LAURE SCHALCHLI es periodista científica.

Las semejanzas entre moléculas microbianas y humanas intervienen en ciertas enfermedades autoinmunes. Algunos investigadores brasileños piensan que, probablemente, éste sería el caso de la enfermedad de Chagas, debida a un parásito.

Imitando la estructura de proteínas humanas, ciertas moléculas producidas por los microorganismos pueden inducir el sistema inmunitario a error y llevarlo a atacar el propio organismo. Este «mimetismo celular», reconocido hace mucho por los inmunólogos, es posible que intervenga en diversas enfermedades llamadas autoinmunes, como la esclerosis de placas. Pero todavía faltan las pruebas que lo confirmen.

De manera sorprendente, dos grupos de investigadores han llegado a la conclusión de que este proceso interviene en la enfermedad de Chagas, una afección parasitaria que causa estragos en América del Sur. El anuncio se hizo en la reunión anual de investigación fundamental sobre la enfermedad, celebrada el pasado noviembre en la pequeña ciudad de Caxambu, al sudeste de Brasil.[1] El parecido entre ciertas proteínas del parásito y algunas proteínas del corazón humano explicaría la insuficiencia cardiaca que afecta entre el 20 y el 25 % de las personas infectadas. Así, la enfermedad podría ser provocada, por lo menos en parte, por un mecanismo de autoinmunidad, una hipótesis apuntada ya en 1958 por el brasileño Z. Andrade.

El parásito en cuestión, un tripanosoma (*Trypanosoma cruzi*), es menos conocido en Europa que otros protozoos* causantes del paludismo o la enfermedad del sueño. Sin embargo, el *Trypanosoma cruzi* infecta a unos 18 millones de personas en América del Sur y América Central, donde constituye un enorme problema de salud pública. Por ejemplo, en Brasil produce cada año varios miles de víctimas, que suelen fallecer debido a una insuficiencia cardiaca. De momento, los medicamentos que hay en el mercado son eficaces sobre todo en la fase aguda de la enfermedad, aunque provocan efectos secundarios graves (adelgazamiento, trastornos neurológicos y alteración de la fórmula sanguínea).

La enfermedad, descubierta en 1909 por el médico brasileño Carlos Chagas, es transmitida al hombre por unas chinches chupadoras de sangre, las triatomas. El *Trypanosoma cruzi* vive y se multiplica en el intestino de estos insectos, que, con sus heces, que manchan la piel alrededor de las picaduras, contamina al hombre: el simple reflejo de rascarse permite al parásito introducirse en los tejidos dañados. Actualmente, las transfusiones sanguíneas constituyen otra vía importante de contaminación, agravada por la movilidad cada vez mayor de los donantes de sangre. Esto ha hecho que en Estados Unidos se hayan registrado varios casos en los últimos años. La enfermedad pasa a menudo inadvertida y se parece a una simple gripe. Casi los dos tercios de las personas infectadas no sufrirán ningún otro síntoma en el transcurso de su vida. Pero en el 30 % al 40 % de los pacientes aparecen 10, 20 e inclu-

PROTOZOOS especies unicelulares, muchísimas de las cuales provocan enfermedades en el hombre y el animal; por ejemplo, los plasmodios, los tripanosomas, las leishmanias, etcétera.

RIBOSOMAS corpúsculos intracelulares formados por ácido ribonucleico y proteínas. Intervienen principalmente en la síntesis de las proteínas.



***La enfermedad de Chagas, provocada por un tripanosoma (Trypanosoma cruzi,** visto aquí en microscopio electrónico de barrido), se transmite por la picadura de unas chinches, las triatomas. Los brasileños las llaman «barbeiros», o barberos, porque tienen la costumbre de picar a sus víctimas alrededor de la boca. Se refugian en los intersticios de las paredes y proliferan en las casas en ruinas hechas de tierra y madera. (Foto CNRI.)*

so 60 años más tarde los primeros signos de la enfermedad crónica: dilatación del colon o del esófago en las formas digestivas (en Brasil, 8 % al 10 % de las personas infectadas), insuficiencia cardiaca con riesgo de muerte súbita en las formas que afectan el corazón (20 % al 25 % de los casos). Estas formas crónicas intrigan a los investigadores. Según algunos, la pequeña cantidad de parásitos que subsiste en el interior de las células cardiacas no parece explicar la inflamación del corazón y las anomalías de su funcionamiento (disminución o aceleración del ritmo, desincronización de la contracción de las aurículas y de los ventrículos), que terminan por matar a ciertos enfermos.

(1)
«XXII Annual Meeting on Basic, *Memorias do Instituto Oswaldo Cruz*, vol. 90, supl., 1995.
(2)
E. Cunha-Neto y J. Kalil, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA 92*, 3541, 1995.
(3)
I. Ferrari *et al.*, *J. Exp. Med.*, *182*, 59, 1995.
(4)
M.E. McGrath *et al.*, *J. Biol. Mol.*, *246*, 251, 1995.
(5)
J.A. Urbina *et al.*, *Mol. Biochem. Parasitol.*, 1995.
(6)
J.A. Urbina *et al.*, *Chemotherapy*, 1995.
(7)
M.I. Cano *et al.*, *Mol. Biochem. Parasitol.*, *71*, 272, 1995.

En el corazón de los enfermos se han infiltrado células inmunitarias dirigidas, a la vez, contra una proteína cardiaca y una molécula parasitaria

Para encontrar una explicación, el equipo de Jorge Kalil, de la Universidad de São Paulo, Brasil, partió de una constatación: la sangre de los enfermos contiene anticuerpos dirigidos contra la miosina cardiaca, una proteína clave en la contracción de las fibras cardiacas. A comienzos de 1995, descubrieron que estos mismos anticuerpos reconocían también una proteína del parásito, la proteína B13, aislada en 1993 por la brasileña Bianca Zingales, de la universidad de São Paulo.[2] De hecho, ambas proteínas —miosina humana y proteína B13 del parásito— contienen partes casi idénticas. Y todavía más: el corazón de los enfermos contiene, infiltradas, células inmunitarias, linfocitos T, dirigidos tanto contra la miosina cardiaca como contra la proteína parasitaria. De ahí la conclusión apuntada por los investigadores: el sistema inmunitario reconoce la proteína parasitaria, toma como objetivo la miosina y lesiona el tejido cardiaco. Jorge Kalil ya piensa en una aplicación terapéutica: «*Se podría inducir una tolerancia inmunitaria administrando al enfermo un equivalente de este péptido o intentando una vacunación con anticuerpos antimiosina*».

Un segundo ejemplo de mimetismo molecular fue descubierto por casualidad.[3] Hace cuatro años, el equipo de Mariano Levin, del INGEBI (Instituto de Ingeniería Genética y Biología Molecular), de Buenos Aires, y el de Johan Hoebeke, de la universidad de Tours y del CNRS, observaron un parecido sorprendente entre la proteína P0 de los ribosomas* del parásito, aislada por el grupo argentino, y ciertos receptores del corazón que estimulan el ritmo cardiaco en respuesta a la adrenalina, un neuromediador. Comprobaron que los enfermos tenían muchos anticuerpos dirigidos contra las dos proteínas y pudieron estudiar el efecto de estos anticuerpos sobre las células cardiacas de rata en cultivo. «*Ahora desearíamos tratar de reproducir los síntomas de la enfermedad en el animal, utilizando anticuerpos dirigidos contra estos receptores adrenérgicos*», explica Johan Hoebeke. Como en cualquier enfermedad supuestamente autoinmune, es muy difícil probar que los anticuerpos producidos por los enfermos son el origen de la enfermedad. «*La respuesta inmunitaria contra la miosina o cualquier otra proteína humana podría ser la consecuencia, y no la causa, de los daños cardiacos provocados por un pequeño número de parásitos*», puntualiza Julio Scharfstein, inmunólogo de la universidad federal de Río de Janeiro y organizador del congreso de Caxambu. Sin embargo, la investigación de un medicamento que ataque directamente el parásito no se ha abandonado, ni mucho menos. El objetivo podría ser una de las proteínas vitales para el *Trypanosoma cruzi*, como la cruzipaína (o cruzaína), un enzima indispensable para su crecimiento en el interior de las células humanas. Definido a finales de los años 1980 por el grupo de Juan J. Cazzulo, de la fundación Campoamor, de Buenos Aires, y el de Julio Scharfstein, el enzima ha podido ser cristalizado recientemente por J. McKerrow, C. Craik y sus colaboradores, de San Francisco.[4] Buenos conocedores de la estructura en tres dimensiones del enzima, los investigadores tratan ahora de obtener compuestos sintéticos capaces de bloquearlo sin perturbar los que hay en los mamíferos. El equipo californiano dispone ya de un inhibidor que, probado en ratones, consigue reducir la cantidad de parásitos y prolongar el tiempo de supervivencia de los animales infectados.

Pero la investigación terapéutica se ve frenada por la lentitud de las firmas farmacéuticas en desarrollar un medicamento destinado principalmente a poblaciones pobres. De ahí el interés de la labor de Julio A. Urbina y sus colegas del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, de Caracas.[5,6] Todas sus esperanzas están puestas en un compuesto (denominado D0870) que ya ha sido desarrollado por la firma británica Zeneca Pharmaceutical para el tratamiento de las micosis en los enfermos de sida. La molécula, probada *in vitro* e *in vivo* en el ratón por los investigadores venezolanos, es muy eficaz contra el *Trypanosoma cruzi* y, dentro de poco, podría pasar a la fase de ensayo clínico en el hombre. Actúa bloqueando la producción de esteroles (compuestos parecidos al colesterol y a las hormonas sexuales animales) indispensables para el parásito. Julio Urbina presentó sus últimos resultados en el congreso de Caxambu: curación con desaparición total del parásito en el 80 % al 90 % de los ratones víctimas de enfermedad aguda, y en el 70 % al 90 % de los afectados de enfermedad crónica. «*Es la primera vez que se obtiene una curación completa en un modelo crónico de enfermedad de Chagas, lo que se consideraba imposible*», dice, entusiasmado, el biólogo. Pero, si bien la autoinmunidad desempeña un papel clave en las formas crónicas de la enfermedad de Chagas, no es seguro que la sola eliminación del parásito sea suficiente para curar a los enfermos. Sería necesario, además, bloquear la reacción autoinmunitaria. **L.S.** ■

OTRO PROYECTO GENOMA

En Brasil, el estudio del parásito responsable de la enfermedad de Chagas se ha convertido, desde hace unos 15 años, en uno de los motores principales de la investigación en biología molecular. El punto culminante de este esfuerzo fue un proyecto de secuenciación del genoma del *Trypanosoma cruzi*, puesto en marcha por la OMS en 1994. Único proyecto de esta amplitud dirigido por sudamericanos, implica actualmente a más de quince laboratorios en Brasil, Argentina, Chile, Venezuela, España, Estados Unidos, Suecia y Alemania, en colaboración con el Centro de Estudio del Polimorfismo Humano (CEPH), de París.[7] Pretende conocer mejor la biología molecular y celular del parásito y dar un mayor impulso a la investigación de un tratamiento de la enfermedad de Chagas, multiplicando los objetivos potenciales para el diseño de nuevos medicamentos. En principio, en 1994, el CEPH acogió durante unos seis meses un grupo de investigadores argentinos, brasileños y españoles, con el fin de crear una «genoteca» del *Trypanosoma cruzi*. Para ello, el genoma del parásito —cuyo tamaño se estima en 87 millones de elementos, los nucleótidos (en comparación, el genoma de la levadura, descifrado muy pronto, cuenta con 12 millones de ellos)— se cortó en fragmentos de gran tamaño, los cuales se introdujeron en cromosomas de levadura (Yac) o de bacterias (Bac). A partir de esta genoteca, a finales de 1996 podría quedar listo un mapa físico de baja resolución, consistente en jalonar con marcas el genoma del parásito. La desencriptación de las secuencias de DNA portadoras de la información genética, es decir, del orden de los nucleótidos que se suceden en los cromosomas, se ha iniciado hace poco tiempo en la fundación Oswaldo Cruz, de Río de Janeiro. Con el tiempo, el proyecto debería utilizar cinco secuenciadores automáticos. «*Si todo va bien, a finales de 1996 podremos secuenciar 200.000 pares de bases al día, lo que permitiría tener desencriptado el 30 % del genoma dentro de tres años*», explica Mario Levin, coordinador del proyecto.

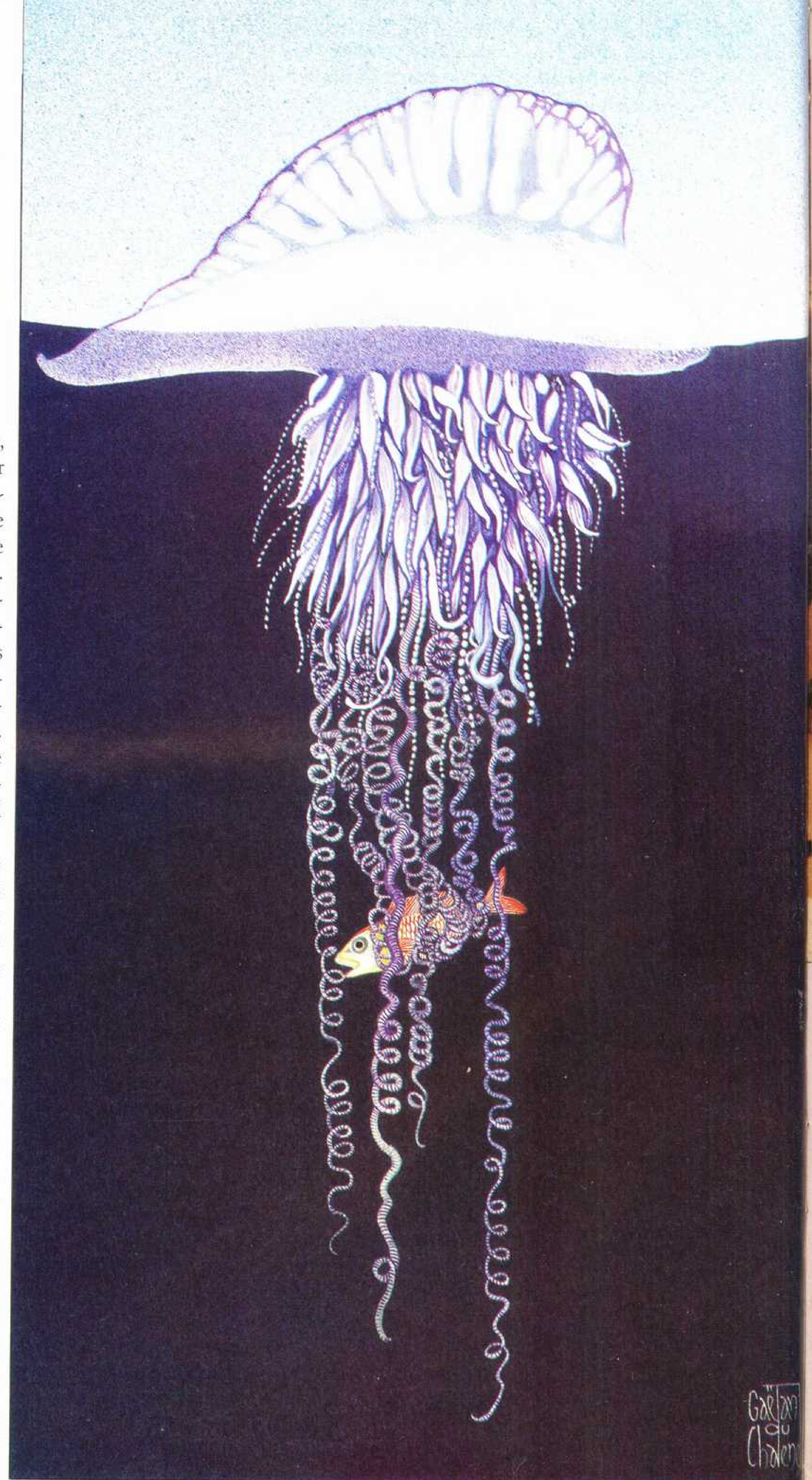
CHARADA ENTRE DOS AGUAS

Stéphane Deligeorges

La complexión de las fisalias continúa siendo un desafío para el entendimiento

La primera impresión es que se trata de un animal que forma un organismo completo. La segunda impresión, sin embargo, es que está compuesto de órganos que se reproducen distintamente, pero desprovistos de autonomía. ¿Cómo hay que llamar a este conjunto? Después de dos siglos, las medusas, y en especial las fisalias, intrigan a los naturalistas. Actualmente han perdido su misterio fisiológico. Pero las fisalias siguen siendo un enigma morfológico viviente.

STÉPHANE DELIGEORGES es periodista científica.



En las aguas cálidas del Atlántico, los marineros pueden encontrar a veces inmensos grupos formados por miles de fisalias. Su flotador, de un azul intenso y que emerge más de veinte centímetros, les sirve de vela. Estos animales son unos temibles predadores. Están muy bien armados con cápsulas urticantes que contienen toxinas paralizantes. También se les llama «galeras portuguesas», porque sus grupos hacen pensar en una especie de armada. Los ingleses les dieron el nombre de «*The Portuguese man-of-war*», seguramente porque su flotador recuerda el casco de los «conquistadores».

La composición de estas fisalias, que la sistemática incluye en el orden de los sifonóforos, es de una originalidad desconcertante, radical. Casi sin cambiar nada, se le puede aplicar la reflexión de François Péron al principio de su «*Histoire générale des méduses*», que data de 1808, donde escribía: «*Ninguna otra familia reúne más singularidad en la materia, más rareza en las formas, más variedades en los órganos, más anomalías en las funciones y ninguna otra presenta a los fisiólogos más problemas por resolver, más descubrimientos por perseguir*».[1] En efecto, las fisalias se nos aparecen como uno de los organismos más singulares de nuestro mundo. Su descripción es de una inmensa dificultad. Ya de buen principio plantean la cuestión de su identidad exacta, entendida en el sentido de su unicidad. En latín se podría decir: ¿son *unum per se*? Así, en principio, se pueden describir considerando cada fisalia como un solo organismo compuesto de

(1) J. Goy, «Histoire générale des méduses» *in Les Méduses de Péron et Lesueur. Un autre regard sur l'expedition Baudin*, ediciones del CTHS, París, 1995.

(2) P.P. Grassé, *Traité de zoologie*, t. III, fasc. 2, *Cnidaires, Cténaires*, 1995.

varios órganos: un flotador que sostiene un conjunto de elementos, algunos de función digestiva, otros de función captadora.

Ahora bien, desde un punto de vista diferente y contradictorio con el primero, ¿no hay que considerar más bien a la fisalia como una especie de república, un organismo colonial muy estructurado, compuesto de individuos? El naturalista alemán de principios de siglo, Ernst Haeckel, hablaba de *«personas»*. En este caso, ciertos individuos serían el velamen. La procreación correría a cargo de individuos reproductores. La captura, de individuos con esta única especialización. *Ídem* para la digestión...

La singularidad de la fisalia es absolutamente evidente si se la compara con una colonia de hormigas, donde también hay una especialización extrema de tareas y funciones. Cada individuo contribuye a la vida del conjunto. Hay que decir que, en este ejemplo, los individuos tienen autonomía de movimientos. En la fisalia no es así. Todos los miembros de la colonia conservan una «individualidad» completa, pero carecen en absoluto de movilidad propia. Cada uno permanece coordinado y definitivamente ligado al conjunto. ¿Se puede hablar entonces de un superorganismo?

«Desde hace más de un siglo, las teorías están enfrentadas tratando de saber si un sifonóforo es una colonia de individuos especializados o un individuo formado por órganos diferentes», escriben C. Carré y D. Carré. *«Según se considere al animal desde un punto de vista fisiológico o morfológico, las opiniones divergen. En el primer caso, se impone la calificación de individuo único. Ninguna de las estructuras de los sifonóforos es capaz de vivir aislada. Todas colaboran de manera coordinada e integrada a la vida del conjunto. Por el contrario, desde un punto de vista morfológico, es posible homologar los gastrozooides* (individuos que desempeñan la función digestiva) *con individuos polipoides del tipo hidra* [...], *introduciendo así el concepto de colonia referido al conjunto del sifonóforo. Definiremos los sifonóforos como superorganismos formados por la asociación de individuos cuya especialización es tal, que pueden ser asimilados a órganos»*.[2]

¿Cómo se puede conocer este colectivo de ciudadanos? Se verá que todos repiten, a su nivel, la singularidad que presenta el conjunto de la fisalia. Pero, en primer lugar, hay que recordar el particularismo general que muestra el fílum de los cnidarios, entre los que está clasificada la fisalia y que había preocupado profundamente a los naturalistas del siglo XVIII. Se trata de su reproducción. Con mucha frecuencia, en una misma especie de medusas se encuentran dos fases perfectamente diferenciadas. Una, asexuada y sedentaria, es la fase pólipo. La otra fase, de vida sexuada y planctónica, y por tanto libre, es la fase medusa. En la fisalia, ambas están presentes.

Observemos ahora a los componentes de la extraordinaria colonia. En primer lugar, está el neumatóforo, a la vez flotador y vela. Es una vesícula hueca, agujereada por un poro apical, que se caracteriza por un tejido secretor de gas, fundamentalmente óxido de carbono. El neumatóforo es la estructura básica. Debajo de él se organiza la colonia. Todo parte del estolón, una especie de plataforma bajo la cual se insertan todos los elementos de esta república que, para simplificar, se pueden clasificar en cuatro clases de pólipos, cada una de las cuales se agrupa en cormidios, o sea, subconjuntos o subcolonias. Están especializados en las funciones de predación, digestión, excreción y reproducción. Estos últimos, llamados gonozooides, son machos y hembras y contienen espermatozoides y ovocitos. Hay también los gastrozooides, unos pólipos nutricionales comparables a hidras, pero sin tentáculos.

Una multiplicación iterativa asexuada de sus miembros constituye la base de la república fisalia

La predación corre a cargo de unos largos filamentos pescadores y retráctiles que, desenrollados, pueden llegar a tener diez metros de longitud. Están recubiertos de numerosas baterías de cnidocistos, unas células urticantes. Cada una de ellas oculta una especie de arpón provisto de barbillas y espinas, y que, proyectado, sirve para inyectar una potente toxina paralizante. (El detalle de este extraordinario instrumento de caza merecería, por sí solo, una extensa descripción; aquí sólo mencionaremos el principio de la anafilaxia, descubierto en la fisalia por Paul Portier y Charles Richet —premio Nobel 1913—, principio definido en 1936 por este último como *«la propiedad de la que está dotado un veneno de disminuir en lugar de aumentar la inmunidad, cuando se inyecta en dosis no mortales»*.)

Falta todavía otro «ciudadano» por mencionar: el cistozooide, el mayor de ellos. Este pólipo excretor desempeña un papel accesorio en la digestión de las presas. Su función es proporcionar una sustancia que disuelve los tejidos, pero también posee un filamento pescador. Subrayemos de nuevo que cada uno de estos «ciudadanos» conserva su propia identidad. De ahí el fascinante enigma de la reproducción de la fisalia, esta república animal que hace inevitable una avalancha de preguntas. ¿Cómo se reproduce cada uno de los individuos? ¿Cómo se agregan para formar un conjunto? ¿Cuál posee el diseño global? ¿Es la medusa que da origen al flotador, o más bien son los pólipos gonozooides?

¿Se puede imaginar el hígado o el corazón de un mamífero de ficción que no obedezca al mismo sistema reproductor que un pulmón o un riñón y se reúnan para formar un organismo?

No hay duda de que las respuestas no serán sencillas —la singularidad de este ser es grande— y requerirán una gran atención. Todo ocurre ya a partir de la fase larvaria. Ya hemos visto que la fisalia, que comete la picardía de mezclarlo todo, es dioica, o sea, hermafrodita. Posee células masculinas y femeninas. La fecundación es externa y se realiza en el mar. En la eclosión, la larva es alargada (500 mm de longitud). La región anterior se transformará en el flotador. La región posterior produce el primer gastrozooide y su filamento pescador. Los especialistas lo reconocen por su gran tamaño, El nombre de esta fase larvaria es *cystonula*. A partir de ahí empieza otro proceso, el de la proliferación de los cormidios, de los que se desarrollan toda una cohorte. De nuevo aparecen gastrozooides secundarios, cistozooides y filamentos pescadores. La repetición de *n* veces este proceso desemboca en una república-fisalia. El desarrollo de la colonia tiene lugar gracias a esta proliferación mediante reproducción asexuada, es decir, por la multiplicación iterativa simple de los elementos. Aparece luego la reproducción sexuada. Los gonozooides masculinos y femeninos se diferencian; la emisión de células se produce en el agua y el ciclo recomienza. Las pequeñas larvas (las *cystonula*) crecerán y se convertirán en otras fisalias.

Ante el interés del neófito, Jacqueline Goy, del Museo de Historia Natural de París (laboratorio de ictiología) formula el siguiente principio esclarecedor: *«Estas colonias se forman, de hecho, de acuerdo con una doble organización. Primero, la organización primaria: neumatóforo, estolón, gastrozooide, filamento pescador. Luego aparece la organización secundaria: los cormidios, de nuevo con gastrozooides, cistozooides y filamento pescador; después los gonozooides, etc.»*. En definitiva, ¿cabría decir que las fisalias ilustran, a su manera, una inverosímil dialéctica viviente entre lo unitario y lo múltiple?

S.D. ■

NUEVAS PERSPECTIVAS SOBRE EL ORIGEN DEL HOMBRE

Anne Dambricourt-Malassé

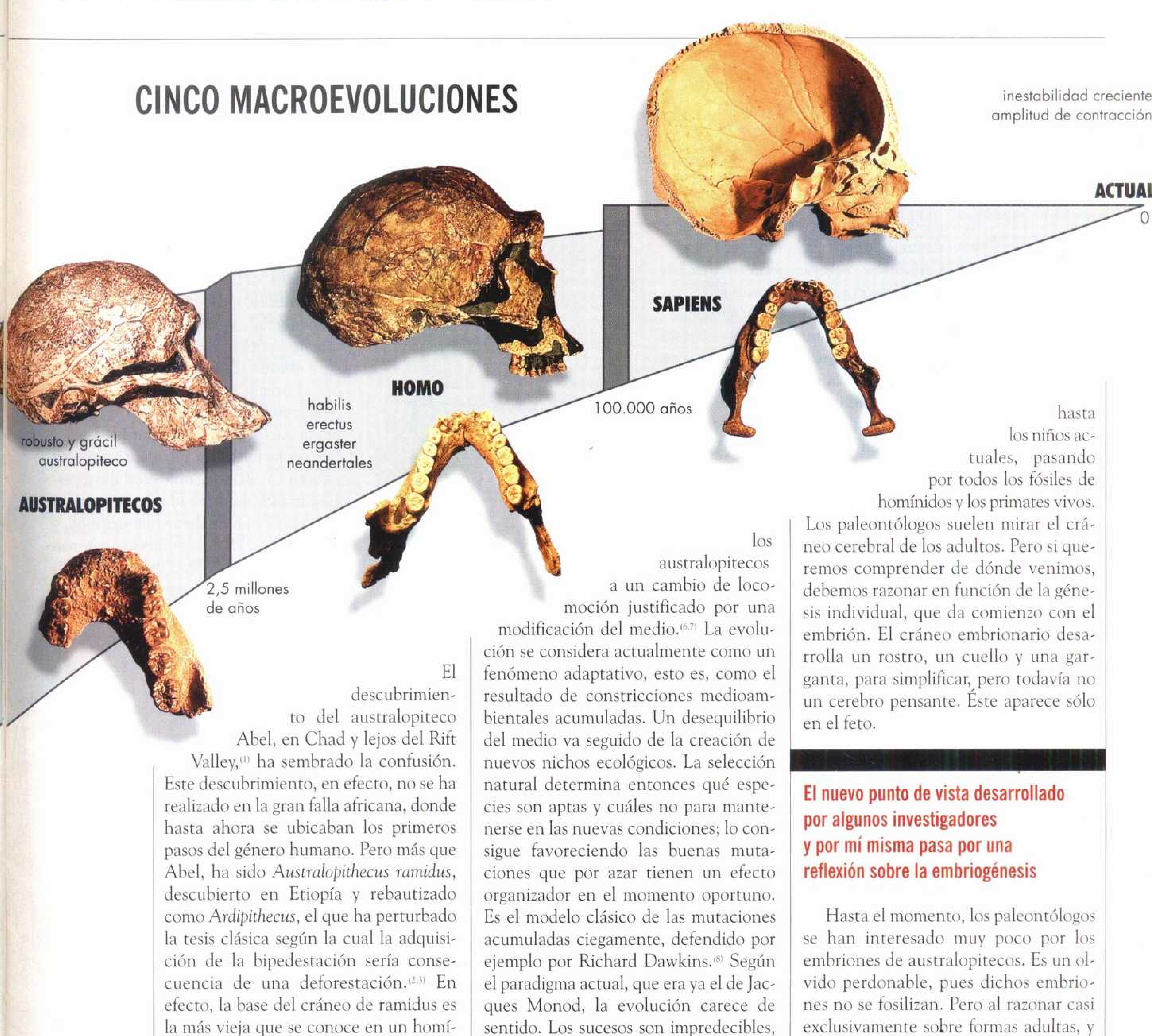
Cinco macroevoluciones y su relación con las modificaciones climáticas



Figura 1. El lugar del ser humano actual en la evolución de los primates viene dado por la medida de un fenómeno de crecimiento. Este proceso, de origen embrionario, acerca el cuello a la cara y coloca toda esta zona debajo del cerebro. El adulto conserva esta huella, que cabe localizar en la mandíbula inferior. El fenómeno, llamado contracción craneofacial, puede ilustrarse mediante una forma geométrica triangular o rómbica. La comparación entre especies pone de manifiesto una evolución según un orden que amplifica la contracción embrionaria. De los primeros primates al hombre, cinco macroevoluciones son posibles.

ANNE DAMBRICOURT-MALASSÉ
Encargada de investigación CNRS/instituto de paleontología humana-laboratorio de prehistoria del Museo nacional de historia natural. Arqueóloga consultora del ministerio francés de Asuntos exteriores.

El descubrimiento de australopitecos en regiones boscosas pone en entredicho la teoría de que la bipedestación fue debida a una modificación del clima. No se trata de una sorpresa para todo el mundo. El análisis cruzado de desequilibrios faciales en los niños actuales, de la evolución de la base del cráneo en la historia de los primates y de diferencias de ritmo de crecimiento en el hombre y los simios actuales está llevando desde hace unos diez años a una concepción totalmente renovada de las diferentes etapas de la hominización.



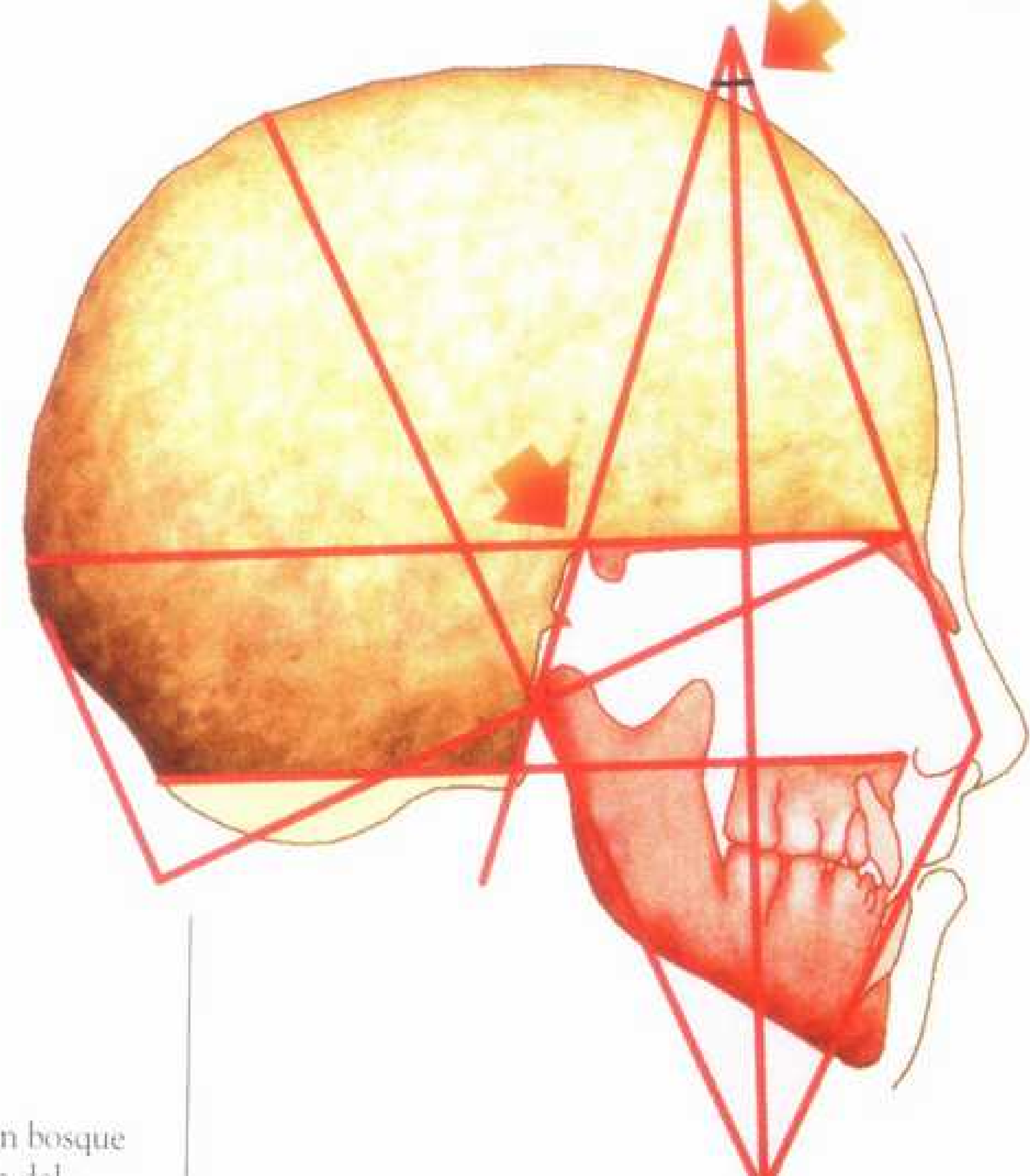
El descubrimiento del australopiteco Abel, en Chad y lejos del Rift Valley,[1] ha sembrado la confusión. Este descubrimiento, en efecto, no se ha realizado en la gran falla africana, donde hasta ahora se ubicaban los primeros pasos del género humano. Pero más que Abel, ha sido *Australopithecus ramidus*, descubierto en Etiopía y rebautizado como *Ardipithecus*, el que ha perturbado la tesis clásica según la cual la adquisición de la bipedestación sería consecuencia de una deforestación.[2,3] En efecto, la base del cráneo de ramidus es la más vieja que se conoce en un homínido bípedo (unos 4,4 millones de años). Los estudios paleomedioambientales han demostrado que este fósil vivía en un medio boscoso, lo mismo que los fósiles de África del Sur.[4][d] El descubrimiento, sin embargo, no ha sido una sorpresa para algunos paleoantropólogos: era esperado e incluso había sido predicho.[5]

Es corriente asimilar la aparición de los australopitecos a un cambio de locomoción justificado por una modificación del medio.[6,7] La evolución se considera actualmente como un fenómeno adaptativo, esto es, como el resultado de constricciones medioambientales acumuladas. Un desequilibrio del medio va seguido de la creación de nuevos nichos ecológicos. La selección natural determina entonces qué especies son aptas y cuáles no para mantenerse en las nuevas condiciones; lo consigue favoreciendo las buenas mutaciones que por azar tienen un efecto organizador en el momento oportuno. Es el modelo clásico de las mutaciones acumuladas ciegamente, defendido por ejemplo por Richard Dawkins.[8] Según el paradigma actual, que era ya el de Jacques Monod, la evolución carece de sentido. Los sucesos son impredecibles, las especies aparecen y se transforman de manera inesperada en el marco de su nicho ecológico. El hombre sería, a fin de cuentas, fruto del azar.

Desde hace unos diez años, yo propongo otra interpretación, basada en el análisis sistemático de la evolución de la base del cráneo, la parte que va de la cara al cuello, desde los primates fósiles hasta los niños actuales, pasando por todos los fósiles de homínidos y los primates vivos. Los paleontólogos suelen mirar el cráneo cerebral de los adultos. Pero si queremos comprender de dónde venimos, debemos razonar en función de la génesis individual, que da comienzo con el embrión. El cráneo embrionario desarrolla un rostro, un cuello y una garganta, para simplificar, pero todavía no un cerebro pensante. Éste aparece sólo en el feto.

El nuevo punto de vista desarrollado por algunos investigadores y por mí misma pasa por una reflexión sobre la embriogénesis

Hasta el momento, los paleontólogos se han interesado muy poco por los embriones de australopitecos. Es un olvido perdonable, pues dichos embriones no se fosilizan. Pero al razonar casi exclusivamente sobre formas adultas, y por lo tanto al hacer abstracción del proceso ontogenético, se consigue que el cuadro se vaya emborronando. Uno se pierde bajo la acumulación creciente de fósiles, que nunca parecen decir dos veces lo mismo. La diversidad de las formas aumenta inevitablemente con el número de descubrimientos, generalmente de restos adultos. El nuevo punto



de vista que algunos investigadores y yo misma estamos elaborando sobre nuestros orígenes pasa por una reflexión sobre la embriogénesis, la de los humanos y los primates actuales, así como la de sus ancestros fósiles en la medida en que su reconstrucción es posible. Esta interpretación se ha beneficiado del encuentro entre la paleontología y una disciplina reciente, la ortopedia dentomaxilofacial.[9,10] Dicha disciplina busca también sus bases, pero los grandes ejes de su conceptualización están progresando con las investigaciones de Marie-Josèphe Deshayes.[11,12] Un número creciente de niños acuden al médico porque tienen problemas de desequilibrio en el desarrollo del rostro.

Es posible aplicar el concepto de biodinámica craneofacial a la evolución de la base del cráneo de los primates

Se trata de que el niño, en vez de ocultar una disarmonía, recupere una buena articulación dentaria, una buena respiración nasal, una buena elocución, una buena audición y la libertad de sonreír. Deshayes ha demostrado que los trastornos del crecimiento craneofacial tienen su sede en la base del cráneo, donde se asocian el cuello y el rostro.

Contemplado en detalle, ningún desequilibrio se parece a otro. No obstante, en el conjunto de la población infantil consultante se observan dos tendencias. Puede ocurrir que la mandíbula inferior esté colocada demasiado hacia atrás, que el orificio occipital (por donde pasa la médula espinal) esté demasiado alto y que se constate una insuficiencia del crecimiento vertical y transversal del rostro (fig. 2). También es posible que ocurra, por el contrario, que la mandíbula inferior esté propulsada hacia delante, que el cuello y la garganta estén demasiado hacia delante y que el crecimiento del rostro sea demasiado vertical. La comparación del cráneo de un niño antes y después del tratamiento ortopédico pone de manifiesto el reajuste de los arcos dentarios y las trayectorias de crecimiento de los tejidos óseos circundantes en correlación con el reposicionamiento de los huesos en torno a la nuca, el cuello, las orejas y el fondo de la garganta. Estas correlaciones son dinámicas; actúan a la altura de las suturas, verdaderos nudos de crecimiento, las cuales, según se ha demostrado, no están determinadas por los genes sino por la fuerzas de la propia dinámica.[13]

Figura 2. La ortodoncia trata de corregir *desequilibrios faciales. Un análisis geométrico revela la relación dinámica entre el cuello, la mandíbula inferior y la parte superior del rostro. Se distinguen dos grandes tendencias, según que la contracción craneofacial sea demasiado pronunciada (a la izquierda) o insuficiente (debajo). (Según Deshayes, 1986.)*

Se puede hablar, sin abuso de lenguaje, de biodinámica craneofacial.[14] Ahora bien, es posible aplicar este concepto a la evolución de la base del cráneo de los primates e introducir en él elementos de rigor matemático.

En 1952, Robert Gudin, alumno por aquel entonces del gran paleontólogo Jean Piveteau, tuvo la genial idea de unir por medio de rectas, en secciones de cráneos vistos de perfil, la base del cráneo con la cara.[15,16] Dichas rectas forman un pantógrafo (fig. 3). Esta imagen geométrica simple permite modelizar la lógica arquitectónica de la base del cráneo, vista de perfil, y sus relaciones verticales con el rostro. Sólo Leroi-Gourhan se ha inspirado en esta herramienta, por lo demás olvidada.[17]

Desde el siglo XVIII, todos los anatomistas saben que, del simio al hombre, la cara pierde prognatismo, el orificio occipital va pasando a un nivel inferior, debajo del cerebro, y el volumen ocupado por la corteza es cada vez más importante. Pero el origen de estas diferencias ha permanecido básicamente inexplicado. Las observaciones de Deshayes, asociadas a nuestros resultados, están brindando un hilo conductor.[18]

Dichas observaciones ilustran la lógica anunciada por el pantógrafo de Gudin. Sea cual fuere el tipo de desequilibrio infantil, sea cual fuere el origen geográfico del niño, algo ocurre alrededor del cuello y el rostro. Los desequilibrios afectan la coherencia craneofacial y engendran un crecimiento caótico, de futuro imprevisible para el niño. El médico debe comprender el origen de estos desequilibrios si desea reinstaurar una trayectoria equilibrada que permita optimizar las funciones orofaciales; ha de identificar una referencia interna, una estabilidad estructurante memorizada de un modo u otro en el plan de desarrollo del niño, y luego situar los desequilibrios con respecto a esta estabilidad que parece disiparse. Por emplear una metáfora mate-

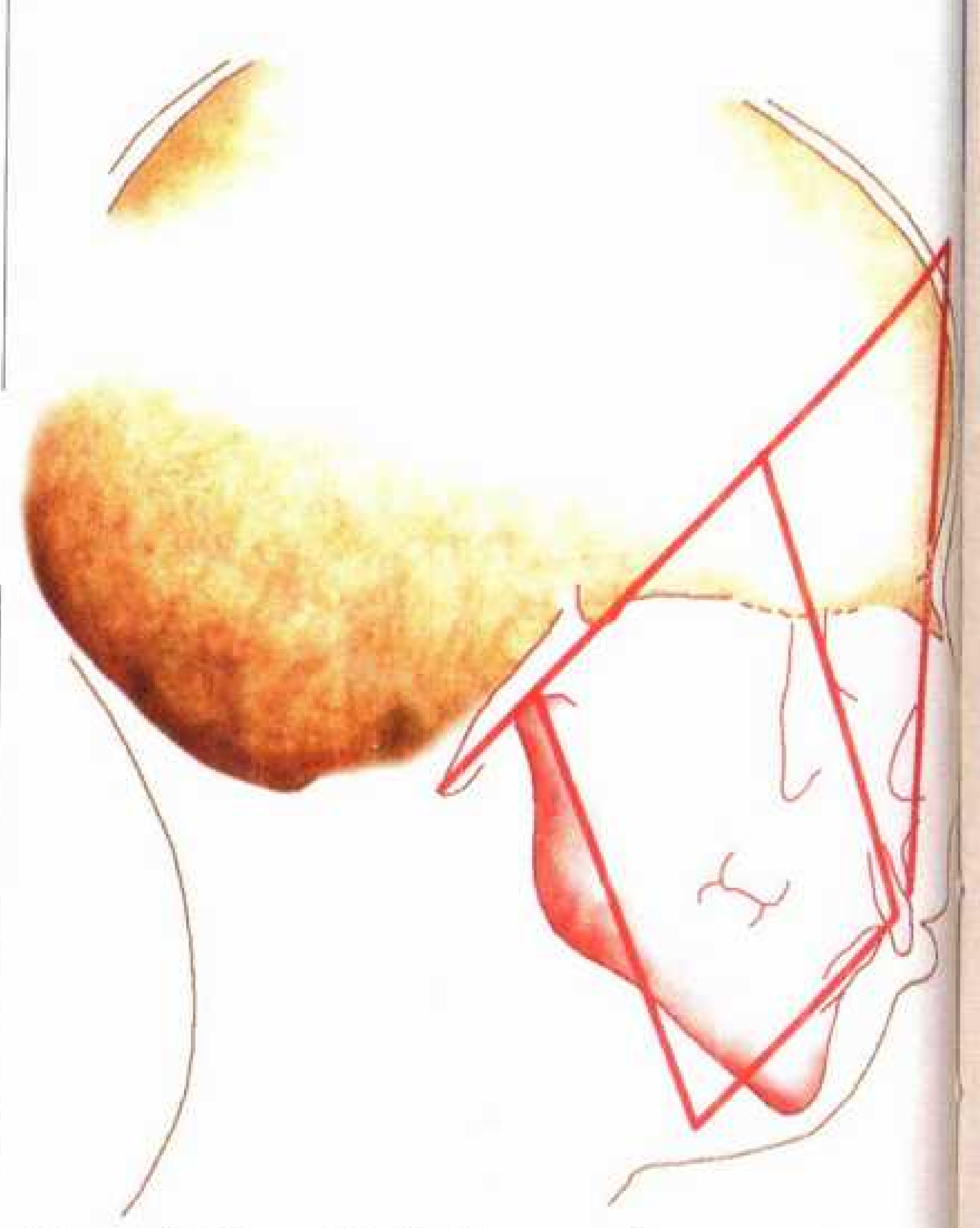


Figura 3. Roger Gudin ha trazado una serie de líneas *que arrojan luz sobre la lógica de la arquitectura craneofacial. El destino del rostro humano está ligado al de la posición del cuello. Un pantógrafo mide las correlaciones entre la base y la cara. Cuando se conservan las correlaciones, cuanto más enderezada está la base del cráneo, más vertical es la cara y más atrás está situada con respecto al cerebro.*

(I) «¿Era un bosque el jardín del Edén?», enero de 1994.
(II) «De la mosca al hombre, un mismo gen para el ojo», diciembre de 1995.
(III) «Los fallos del darwinismo», abril de 1996.

(1) Brunet M. *et al.*, *Nature*, *378*, 273-274, 1995.
(2) Tim D. White *et al.*, *Nature*, *371*, 306-312, 1994.
(3) Tim D. White *et al.*, *Nature*, *375*, 88, 1995.
(4) G. Woldegabriel *et al.*, *Nature*, *371*, 330-333, 1994.
(5) A. Dambricourt-Malassé, *Quaternary International*, *vol. 19*, 85-100, 1993.
(6) K. Lorentz, *L'Homme dans le fleuve du vivant*, Champs Flammarion, 1981.
(7) Y. Coppens, *Le Singe, l'Afrique et l'Homme*, Fayard, 1983.
(8) R. Dawkins, *The Blind Watchman*, 1986.
(9) J. Delaire, *Revue de somatologie*, *79*, 1-33, 1978.
(10) R.L. Fisher, *The New York State Dental Journal*, *vol. 56*, nº 5, 34-37, 1990.
(11) M.-J. Deshayes, *Croissance cranio-faciale et orthodontie*, Masson, 1986.

(12)
M.-J. Deshayes, *Cahiers d'anthropologie et de biométrie humaine* (Paris) XI, nº1-2, p. 135-151, 1993.
(13)
«Craniogenesis and craniofacial Growth», *Nova Acta Leopoldina*, 58, nº 262, pp. 441-445.
(14)
M.-J. Deshayes, *Revue d'Orthopédie Dento-Faciale*, vol. 22, 283, 1988.
(15)
R.G. Gudin, *Bull. Soc. Anthr. Paris*, t. 3, serie X, 59-87, 1952.
(16)
B. Godard y D. Ducasse, *Revue d'Orthopédie dento-faciale*, tomo VII, nº 3, 373, 1973.
(17)
A. Leroi-Gourhan, *Mécanique vivante, le crâne des vertebrés, du poisson à l'homme*, Fayard, 1983.
(18)
A. Dambricourt-Malassé y M.-J. Deshayes, «Modeling of the caniofacial architecture during ontogenesis and phylogenesis» in «*The hard-neck sensory motor system*», Berthoz, Graf, Vidal (eds), pp. 37-46, Oxford University Press, 1992.
(19)
A.G. Jacobson y R. Gordon, *J. Exp. Zool.*, p. 191, 1976.

mática, pero que tal vez sea algo más que una metáfora, el médico va en busca de un atractor estable. En el mismo orden de ideas, el evolucionista puede rastrear, tras los 120.000 años de existencia del hombre moderno y los seis mil millones de individuos actuales, la presencia de una estabilidad estructurante fundamental que se transmitiría a todas las células sexuales independientemente del medio natural.

Una primera tarea consiste en analizar las ocho primeras semanas de desarrollo embrionario en el hombre y los primates actuales. Este periodo corresponde a la creación de los órganos y de las líneas maestras de la arquitectura del esqueleto. El futuro cerebro embrionario de los mamíferos comienza con una placa, llamada placa neural, que se alarga y se convierte en un canalón que se cierra para formar el tubo neural (fig. 4). Este tejido es sede de migraciones celulares y de tensiones entre las células, que se alargan y contraen, provocando movimientos macroscópicos del tejido.[19] Si se mira de perfil, se puede seguir este desarrollo con relación a una estructura celular alargada, la cuerda dorsal (fig. 5). Por delante de la cuerda, el cerebro embrionario se alarga y se cierra, al tiempo que efectúa una rotación espiral hacia atrás. Encima de la cuerda, una parte del cerebro embrionario sigue siendo plana. Alrededor de la cuerda se va a formar tejido cartilaginoso: éste es el origen de los huesos de la base del cráneo que bordean el orificio occipital. La rotación espiral tiene un amplitud tal que esta parte plana bascula a su vez arrastrada por el movimiento general de rotación. Hacia la octava semana, los tejidos cartilaginosos en los que está encajada la cuerda se enderezan y las cápsulas ópticas, que corresponden a las futuras orejas, basculan. La cara inferior contiene un arco cartilaginoso que une las dos cápsulas ópticas y da su forma general a la mandíbula.

En el hombre, llegado este punto, la parte anterior del arco, que corresponderá al mentón, empieza a adoptar una forma de gancho, como si se enderezara, y luego deja aparecer, visto de frente, un vacío triangular (fig. 6). Después de las ocho primeras semanas, la trayectoria sigue su curso mientras que los hemisferios cerebrales siguen desarrollándose siguiendo el arrollamiento espiral. Se vuelve a encontrar la trayectoria al nivel de la mandíbula inferior ósea en los tres planos del espacio. Se puede entonces modelizar en dos planos el desarrollo de la base del cráneo. Al pantógrafo trazado de perfil se le añade un pantógrafo transversal que tiene en cuenta el futuro arco dentario y la orientación de los huesos de la base del cráneo cerebral mirado por debajo (fig. 7). Al nacer el bebé humano, este doble pantógrafo, muy cerrado en el plano vertical y muy abierto en el plano transversal, muestra cómo se posicionan más o menos los huesos debajo del cerebro.

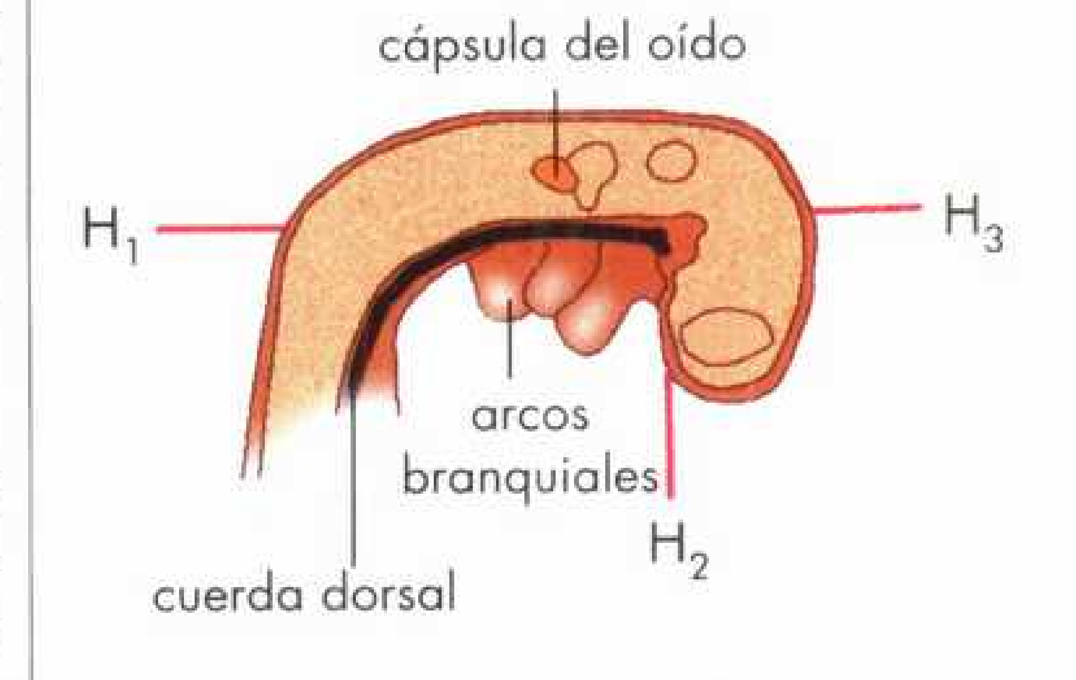
A lo largo de toda esta ontogénesis, está en acción un único atractor que procede por contracciones sucesivas. He llamado a dicha trayectoria contracción craneofacial. Así, se trata del atractor fundamental *Sapiens*, memoria ontogénica que se repite incansablemente desde hace miles de años, en cada uno de nosotros, en los seis mil millones de individuos actuales, cuya singularidad individual trasciende.[20] Atractor armónico, no pierde la memoria de su propia identidad pese a los miles de millones de bifurcaciones que siguen a la fecundación. Los desequilibrios infantiles actuales ponen de manifiesto que el atractor está en oscilación, hasta el punto de romper correlaciones funcionales. No se constatan tales desórdenes en los cementerios de las épocas históricas.

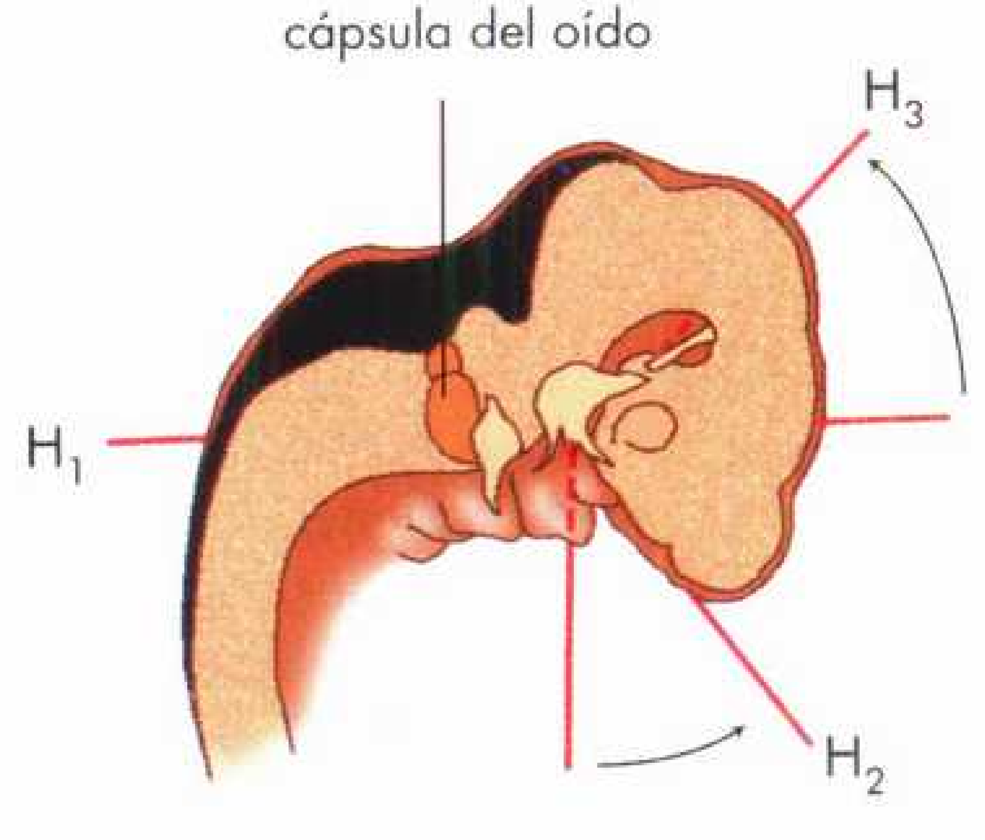
Figura 4. *La historia del cráneo empieza con el tubo neural, la cuerda dorsal y los arcos branquiales. Embrión humano de tres semanas. (Gage, Am. Journ. Anat. vol. IV, 1905.)*

La ortopedia dentomaxilofacial no sólo pone de manifiesto la contracción craneofacial: también revela una realidad sorprendente. Se trata de la existencia de una ventana dinámica, un periodo durante el cual una trayectoria en desequilibrio puede ser reorientada sobre su atractor pese a la creciente complejidad. Si comprende el origen del desequilibrio, el médico puede iniciar el proceso de coordinación dinámica interviniendo lo más pronto posible. Dicho en otras palabras, aunque la ontogénesis sea irreversible, el atractor armónico *Sapiens* es reactualizable en dicha ventana dinámica. ¿Existen ventanas como ésta en la evolución?

El doble pantógrafo da una ley general que permite situar los desequilibrios faciales de los niños actuales en una perspectiva evolutiva

El doble pantógrafo permite modelizar el desarrollo arquitectónico de la base del cráneo en todos los primates, desde los estadios más precoces. Pone de manifiesto una ley general según la cual cuanto más anchos son los huesos de la





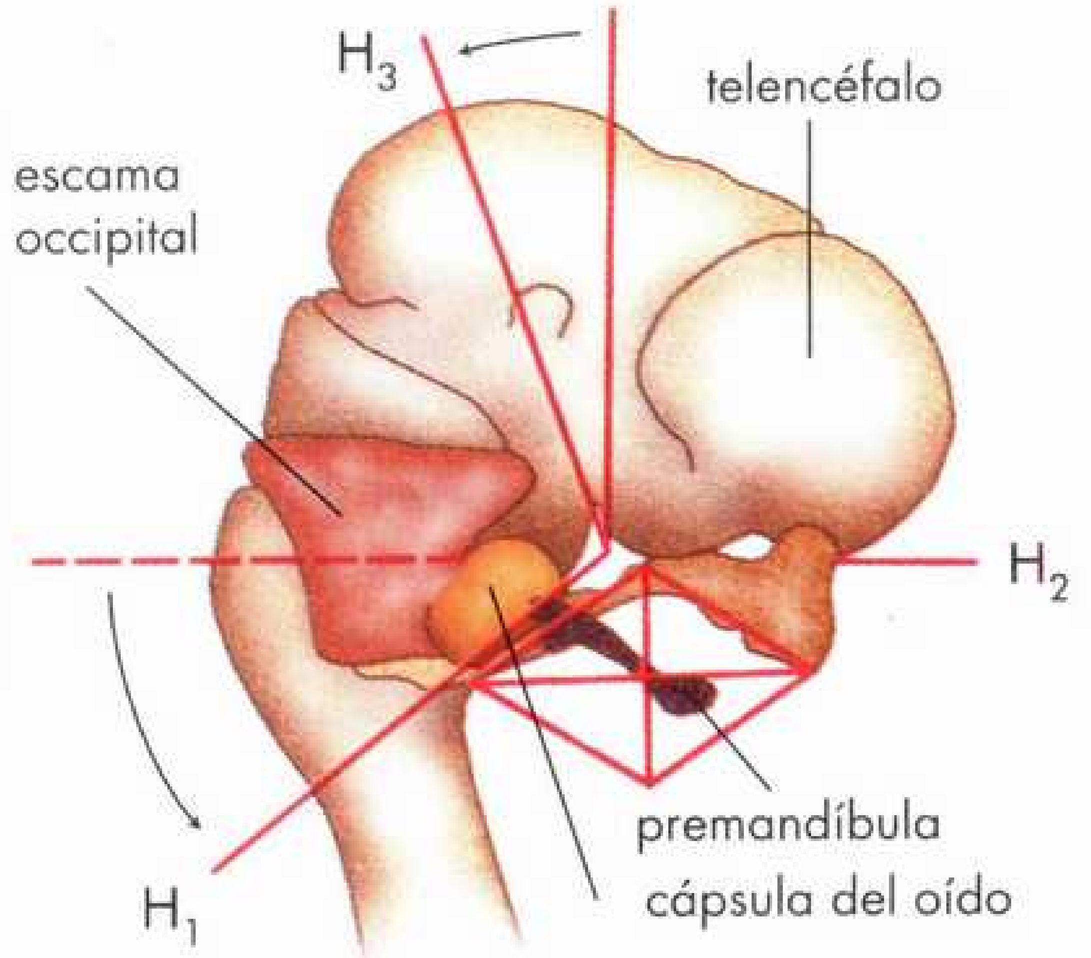


Figura 5. *El tubo neural se alarga, inicia una rotación espiral y provoca el desplazamiento de la base del cráneo, con efectos sobre la mandíbula inferior que pende de ella.*



Figura 6. El cráneo embrionario *(arriba) es una estructura plana, una de cuyas partes se endereza (azul). La cara se desarrolla en este nuevo contexto. (Levi, 1900.)*

(20)
A. Dambricourt-Malassé, *Acta Biotheoretica*, *43*, 113-125, 1995.
(21)
A. Dambricourt-Malassé, *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Paris*, 307, II, 199, 1988.
(22)
A. Dambricourt-Malassé, «L'hominisation et la théorie des systèmes dynamiques non linéaires (chaos)», *Biomaths*, nº 117-119, 1992.
(23)
M. Michejda y D. Lamey, *Folia Primat*, *34*, 133, 1971.
(24)
A. Schultz, *Quat. Rev. Biol.*, *I*, 465-521, 1926.
(25)
D.R. Swindler, «Non human primate dental development and its relationship to human dental development» *in* «*Non-human primate models for human growth and development*», 64-84, 1985.

cara y los dos maxilares y más ubicados están debajo de la frente, tanto más enderezados están los tejidos óseos situados delante del orificio occipital. Nuestra tesis afirma que dicha ley traduce una dinámica inicialmente embrionaria que obedece a una lógica de contracción y perdura y se reitera desde la aparición de los primates, hace unos 60 millones de años.[21,22] Esta ley permite situar los desequilibrios faciales de los niños actuales en una perspectiva evolutiva a gran escala.

Comparando, para empezar, la bases del cráneo de los primates actuales, se distinguen desde la embriogénesis diferencias en las amplitudes de contracción, muy nítidas al nivel de la mandíbula (fig. 8). Ninguna de estas bases tiene el gancho cartilaginoso mandibular propio del *Homo sapiens*. Como todos los mamíferos, los primates comienzan con un cráneo cartilaginoso cerebral plano; todos poseen una rotación espiral del tubo neural pero ninguno tiene la amplitud de flexión-contracción facial de *Sapiens*. El movimiento embrionario de los tejidos cartilaginosos posiciona el orificio occipital. Vemos que esta posición varía en función de las especies: es cada vez más baja a medida que se va de los recién nacidos de los lemúridos a los de los pequeños simios, los grandes simios y los hombres. En el hombre actual este orificio tiene la posición más adelantada, debajo del cerebro. Hay que rendirse a la evidencia: no es la bipedestación lo que posiciona el orificio occipital debajo del cerebro, como a menudo se cree, sino una amplitud de rotación espiral de la base craneana embrionaria, ligada al tubo neural; carece de relación con la presencia o no de árboles al otro lado del seno materno.

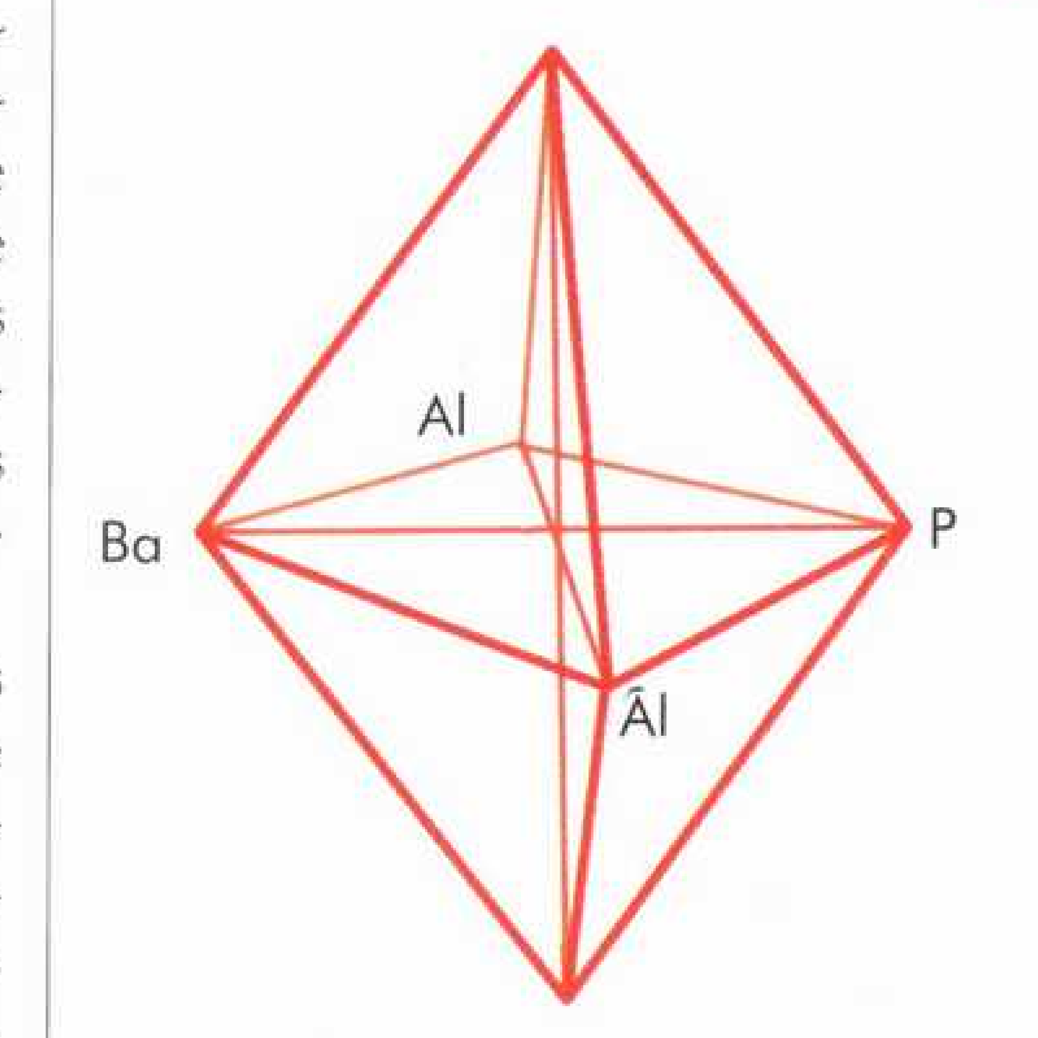
Una excepción aparente (sólo aparente, como se verá) es el tarsio, pariente próximo del lemúrido. Se constata también un intenso movimiento basculante en el embrión del tarsio, pero la mandíbula inferior no cambia. Esta convergencia está ligada al extraordinario desarrollo de las cápsulas ópticas (los ojos) (fig. 9). La trayectoria embrionaria, por tanto, queda flexionada para la base del cráneo pero no sufre contracción por lo que respecta a la esfera craneofacial. A la inversa, la comparación entre un gorila recién nacido, tras ocho meses de gestación, y un feto humano de ocho meses muestra claramente que el principio de construcción es el mismo: la flexión va emparejada con una contracción facial, siendo la amplitud más importante en el hombre (fig. 10).

Según la versión dominante, el australopiteco, y más tarde los hombres, son una bifurcación imprevisible del desarrollo del gran simio. Se dice que el australopiteco es un gran simio bípedo y se pretende que esta bipedestación está ligada a una modificación del medio. Pero no sólo los últimos fósiles hallados no confirman esta tesis, sino que nuestras observaciones la ponen en tela de juicio por razones fundamentales.

Al comparar las bases del cráneo, mandíbula incluida, de todas las especies actuales y fósiles de primates, cualquiera que sea su grado de desarrollo, se constatan agrupamientos en varios niveles de contracción craneofacial embrionaria. Así, estos agrupamientos se suceden en el tiempo desde hace 60 millones de años (fig. 1) y corresponden exactamente a la sucesión de los *phyla* reconocidos por los paleontólogos. Las caras más contraídas, con mandíbulas en forma de V o bien largas y muy estrechas, son de una parte las más antiguas, con los antepasados de los tarsios y los adapiformes, y por otra las especies muy recientes de lemúridos, así como el loris y el tarsio actuales. Ésta es la más antigua memoria embrionaria de los primates.

Hacia los 35 millones de años, se ven mandíbulas más anchas, más cortas, más redondeadas, con un mentón más levantado. Así lo atestiguan, en África, el parapiteco, el propliopiteco y más tarde el pliopiteco, el mesopiteco y el oreopiteco. Esta memoria embrionaria subsiste

Ba
P



Al
Al

Figura 7. La esfera craneofacial *de origen embrionario posee una trayectoria de crecimiento ordenada en torno a una flexión. Esta flexión condiciona el contexto dinámico del crecimiento del rostro, que se convierte en una contracción, modelizada por un doble pantógrafo. Éste asocia la mandíbula a la garganta y el maxilar en las tres dimensiones en función del tiempo.*

actualmente en el macaco, el babuino y el gibón y en América del Sur en el mono aullador y el cebus. Hacia los 20 millones de años, se da una nueva amplitud de contracción con el driopiteco. Esta nueva memoria embrionaria cubre una banda tropical comprendida entre España, por una parte, y África y el Sudeste asiático, por otra.

Corresponden a este periodo el uranopiteco, el grecopiteco, el ramasivapiteco, el lufengpiteco, el gigantopiteco y el kenyapiteco. Dicha memoria persiste, idéntica, hasta el gorila, el chimpancé y el orangután.

Hacia los 5 millones de años, todo empieza a ir muy deprisa. Aparecen ramidus, con su base craneana flexionada de bípedo, que vive en medios arbolados, y una profusión de especies que invaden los espacios más o menos abiertos de las sabanas, en África del este, del sur y hacia el norte, con *Anamensis*, *Afarensis*, *Aethiopicus*, *Africanus* y Abel. Todos tienen en común una unidad craneofacial mucho más contraída que en ningún otro simio: son los australopitecos.

En realidad, toda la base del cráneo del australopiteco pone de manifiesto una amplificación de la contracción de tipo gran simio

Nueva aceleración hacia los 2,4 millones de años: mientras se extinguen los australopitecos, aparecen al unísono en África oriental y meridional unos bípedos de apariencia facial muy simiesca cuya base craneana, sin embargo, está notablemente flexionada. Son los *robustus* y *boisei*, antiguamente llamados parantropos.

Paralelamente, se asiste a la aparición de formas craneofaciales contraídas, con la cara que empieza a situarse muy netamente debajo de los lóbulos frontales, quedando despejados la frente y el cuello. Se trata de *Homo habilis*, *Homo ergaster* y *Homo rudolfensis*. Estos bípedos son seguidos por una nueva explosión de formas humanas en África y Eurasia hasta las latitudes frías de Europa septentrional, Asia central y Siberia. Todas ellas transmiten la misma memoria embrionaria, con diversos *Homo erectus* y más tarde los neandertales.

La evolución parece entonces acelerarse una vez más. Hace unos 120.000 años, la dinámica embrionaria vuelve a oscilar y surge *Sapiens*, todavía más contraído, con la cara debajo de la frente, el mentón saliente, la garganta aún más cercana a los labios y el cerebro cada vez más arrollado sobre sí mismo. La nueva especie está presente en África del Sur y el Próximo Oriente. Apenas nacida, la última memoria embrionaria ocupa todos los continentes, ocupa nuevos medios y logra salir del planeta.

Desde los primeros primates hasta *Sapiens*, se asiste pues a una sucesión cronológica que abarca más de 60 millones de años y se manifiesta por una amplificación de la rotación espiral embrionaria, una contracción craneofacial y una mayor complejidad de la organización de los territorios neocorticales. Un detalle interesante: en las tres primeras embriogénesis, se constata la falta de vacío triangular en la parte inferior de la mandíbula. Este vacío aparece súbitamente en los australopitecos y es amplificado en las memorias embrionarias siguientes (fig. 11). Es un indicio de que la rotación del tubo neural embrionario fue un poco más importante en el australopiteco que en el gran simio. Pero en realidad toda la base del cráneo del australopiteco, joven o adulto, pone de manifiesto una amplificación de la contracción embrionaria que debía de corresponder al gran simio. La base craneana de Ramidus se acorta y los huesos situados junto al orificio occipital se colocan lateralmente.

Pero la evolución no afecta sólo al cráneo. Como indican los esqueletos, estamos probablemente ante una completa reestructuración de la embriogénesis cefalocaudal. Un joven equipo de paleoantropólogos del instituto de Paleontología humana de París trata actualmente de comprobar esta tesis, formulada en 1988.[21] Gilles Berillon ha demostrado que lo que ha cambiado en los huesos de los pies de los hombres es precisamente la organización ontogénica embrionaria común a los gorilas, los



Figura 8.
***Una base flexionada no necesariamente** implica un contexto facial en contracción. El desarrollo del tarsio es parecido al de los primates más primitivos pese a un orificio occipital basculado. La mandíbula sigue siendo estrecha, idéntica a la de un loris.*

(26)
J.C. Eccles, *Evolution of the Brain, creation of the self*. Trad. *Evolution du cerveau et création de conscience*, Fayard, 1992.
(27)
T. Kimura, «Voluntary bipedal walking of infant chimpanzee in gravity. Posture and locomotion in primates», *in* Jouffroy, Starck, Niemitz, «Il sedicesimo», Florencia, 1990.
(28)
M. Koppel, H. Atlan, *Les Théories de la complexité*, Coloquio de Cérisy, Seuil, 188-203, 1991.
(29)
R. Chandebois, *Le Gène et la forme*, Editions Espaces, 34, 1989.
(30)
W.J. Gehring, *Scientific American*, octubre, 153, 1985.
(31)
B. Goodwin, *Acta Biomathematica*, vol. 41, nº 4, 305, 1993.
(32)
A. Simeone *et al.*, *Nature*, 358, 687, 1992.
(33)
R. Thom, *Stabilité structurelle et morphogenèse*, InterEditions, París, 1972.
(34)
I. Prigonine, I. Stengers, *La Nueva Alianza*, Alianza Universidad, 1983.
(35)
M.-P. Schützenberger, «Le hasard peut-il produire la complexité du vivant?», in *L'homme face à la science*, Critérion, 169-184, 1992.

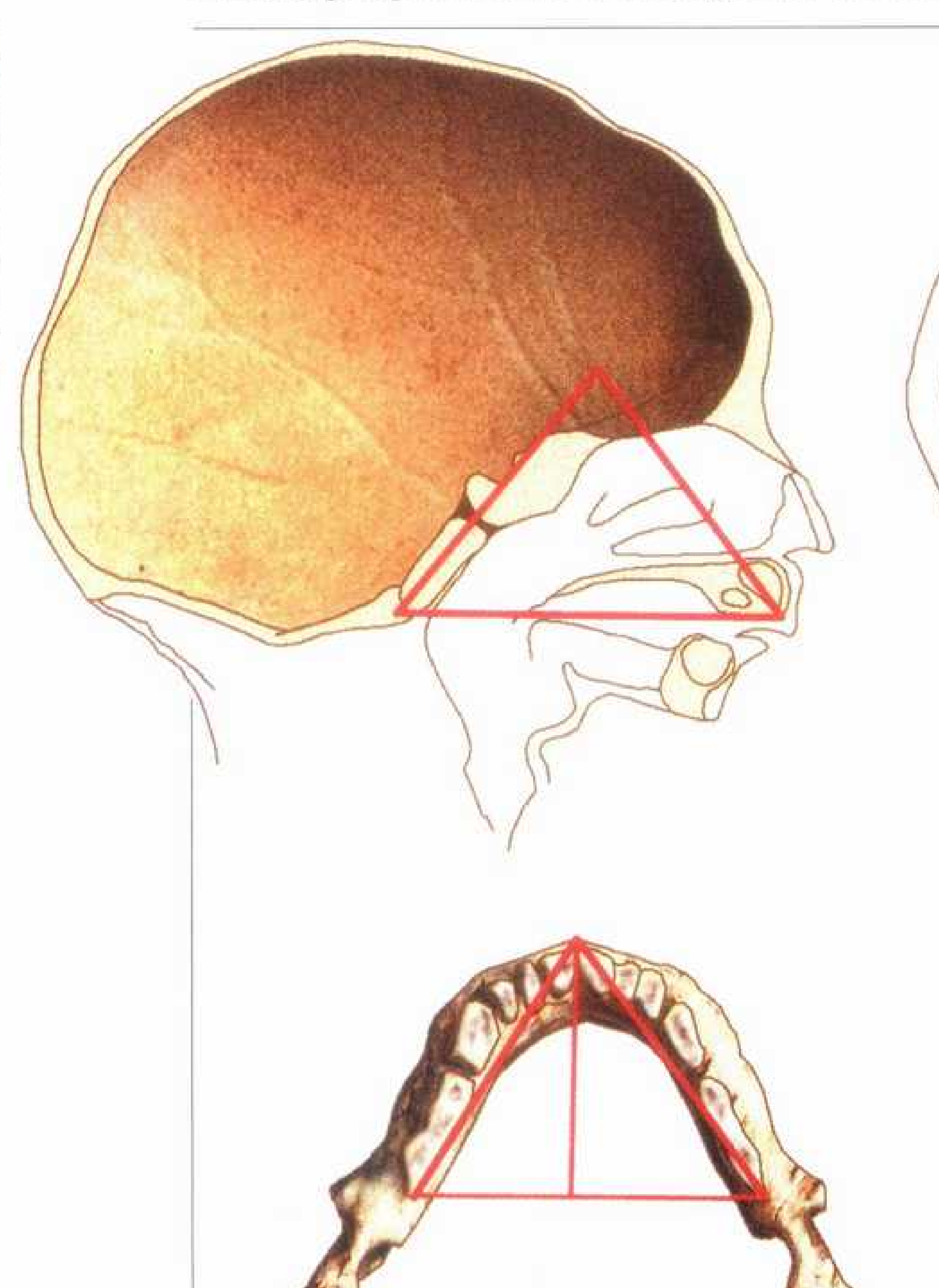


Figura 9. **A medida que nos acercamos** *a los seres humanos, las correlaciones craneofaciales se hacen cada vez más flagrantes. La aplicación del doble pantógrafo a dos fetos actuales de ocho meses, uno de ellos humano y el otro de gorila, muestra la lógica de la contracción.* Homo sapiens *es el más contraído y el gorila está menos avanzado en esta amplitud que complica las correlaciones. Su embriogénesis posee 20 millones de años y la de* Sapiens *120.000 años.*

chimpancés y el driopiteco (20 millones de años). Es significativo al respecto que los grandes simios y los pequeños simios tienen aptitudes para la bipedestación cuando son muy jóvenes.[23] La cría tiene un desarrollo psicomotor de bípedo tanto si sus padres son arborícolas como si no. Esta bipedestación va acompañada de una flexión-contracción; no obstante, la trayectoria no tarda en interrumpirse e incluso en invertirse. A medida que crece el bebé simio, la cara se va desarrollando por delante del cerebro, el orificio occipital se va trasladando hacia atrás y los centros de gravedad del cuerpo y de la cabeza se mueven al revés de lo observado en el hombre (fig. 12). Así, la base del cráneo entra en extensión y el equilibrio locomotor en el suelo tiende a la cuadrupedestación sea cual fuere el medio.

¿Qué es lo que ha evolucionado en realidad? La trayectoria embrionaria compartida por ciertas especies actuales y fósiles

Está claro que nos encontramos en presencia de unos determinismos ontogénicos muy poderosos independientes del medio. La bipedestación humana está ligada a modificaciones completas del sistema neural, el cual tarda más en desarrollarse que en el gran simio. *Homo sapiens* posee el desarrollo psicomotor más largo y tardío de todos los primates.[24] Nuestra especie cambia su dentición de leche a partir de los 6 años, mientras que el gran simio comienza a hacerlo a los 3.[25] En el australopiteco, este retardo ya es perceptible: el cráneo adquiere los caracteres adultos más tarde que en un gran simio. En el niño de Taung, por ejemplo, se observa un retraso del desarrollo frontal con respecto a un gran simio de la misma edad dentaria, el cual aborda ya el desarrollo de la cara formando la barra encima de las órbitas. De hecho, el retraso entre el hombre y los simios se produce a partir de la fecundación, desde las primeras células del embrión, donde se constata ya una diferencia de varias horas.

John Eccles cree, probablemente con razón, que el neocórtex del australopiteco debía de ser más complejo que el de un gran simio, ya que intervenía en la coordinación del control de la marcha bípeda e introducía actos voluntarios.[26,27] En el australopiteco, el tiempo suplementario dado al desarrollo del tejido neural va probablemente acompañado de una prolongación del desarrollo psicomotor y de una reorganización de los centros neuromotores. Las relaciones de esta dinamización interna con las variaciones de densidad de la cubierta vegetal son cuando menos hipotéticas.

¿Qué es lo que ha evolucionado en realidad? Se observa que numerosas especies actuales tienen la misma raíz embrionaria que las especies fósiles. Existen, pues, fondos embrionarios comunes que atraviesan las especies y las épocas. Esta constatación me ha llevado a definir una unidad biológica, que llamo ontogénesis fundamental. Se trata de la trayectoria embrionaria común compartida por ciertas especies actuales y fósiles. Ésta es la unidad que habría evolucionado desde los primeros primates a los australopitecos y de éstos a los hombres modernos. Estamos lejos de las concepciones actuales que convierten el australopiteco o el hombre en especies de grandes simios bípedos o, dicho en otros términos, en especies de la memoria embrionaria de tipo gran simio.



Figura 10. ***La mandíbula fetal humana*** *consta de dos huesos pares unidos en su parte posterior a la base del cráneo por un cóndilo articular. Los gérmenes dentarios están contenidos en un cavidad alveolar colocada sobre una base ósea rectilínea. Las dos partes alveolares se unen en la sínfisis, mientras que las dos bases se alejan. Aparece un vacío triangular, que se hace visible en el embrión después de la flexión. Este vacío, osificado y libre en* Sapiens*, forma el mentón, inexistente en los demás primates.*

Hay que distinguir entre dos niveles de evolución. La especie es la unidad básica de la microevolución, ya que transmite la memoria embrionaria, la trayectoria. Sometida a los azares del medio, ésta cambia de manera imprevisible. Los sucesos que hacen pasar del simio al australopiteco, o de éste a *Homo*, responden a otra lógica. No estamos ya en presencia de una evolución adaptativa. Es la ontogénesis fundamental de un número de especies la que eleva su nivel de organización.

Este punto de vista modifica profundamente el enfoque clásico del paleontólogo. La búsqueda del antepasado común no tiene ya la misma significación. Los ancestros son conocidos. El ancestro de los australopitecos es el fondo embrionario de tipo gran simio en acción desde hace 20 millones de años. El ancestro de los hombres arcaicos es el fondo embrionario común a todas las especies de australopitecos. Lo que no sabemos, en cambio, es cómo permanece estable el atractor, cómo se reorganiza el embrión y de qué forma se hace más compleja la dinámica. En todo caso, la selección natural por sí sola no explica la reiteración sistemática de un principio dinámico creador de embriogénesis inéditas. Así, la selección natural conserva esta dinámica, pero no es la dinámica misma.

Con o sin el hundimiento del Rift Valley y la desaparición de los bosques, el australopiteco es posible porque existe un proceso que permite hacer más complejo de un modo y otro la organización de una ontogenia. Lo que está en discusión es la conservación de este proceso, o, en otras palabras, su transmisión. A partir de un cierto momento, el psiquismo, sin duda, pasa a convertirse en un parámetro. Este factor, también en rápida evolución, puede influir en el área de distribución de la nueva ontogénesis fundamental. La población acaba seleccionando su medio a través de actos voluntarios.

Varios fósiles de australopitecos y de hombres modernos sugieren evoluciones ontogénicas caóticas, que no conservan la memoria de esta dinámica evolutiva: tales fósiles emergen de lógicas inesperadas. Esto se constata en los parantropos, hace unos 2,4 millones de años. Su orificio occipital está situado más cerca de la cara, pero ésta no se encuentra debajo de la frente (fig. 13). No se constata la regresión del sistema masticador, como en *Homo*. Según Gilles Berillon, no es imposible que estemos en presencia de dos macroevoluciones. Se puede intentar una interpretación. Hay que imaginar una vasta población de embriones de australopitecos que oscilan súbitamente en torno al equilibrio craneofacial y cefalocaudal.

Diferentes puntos de bifurcación han dado lugar a embriones que se convertirán en parantropos, de una parte, y en hombres de otra. Aunque muy ligeramente diferentes por lo que respecta a sus trayectorias embrionarias craneofaciales, estas dos amplificaciones producen dos evoluciones ontogénicas que divergen totalmente. Una corresponde a la lógica evolutiva que dio lugar a los australopitecos y la otra innova de manera imprevisible, pero termina extinguiéndose. Aquella en la cual se reconoce el proceso es la que dará lugar a *Homo sapiens*.

Hay que razonar en términos de sistemas dinámicos lejos del equilibrio. Se admite la existencia de una población de embriogénesis que oscilan; algunas soluciones son viables y la selección actúa muy pronto sobre las evoluciones embrionarias demasiado caóticas; luego, los parantropos desaparecen. Se observa entonces que las ontogénesis seleccionadas son las que poseen el potencial evolutivo de la hominización.

Así entendida, la hominización no procede gradualmente por pequeños retoques de un único plan embrionario inicial

En el parantropo, la base del cráneo está contraída, pero con reajustes distintos que en los hombres; la ontogénesis va a parar a un antiguo atractor que se vuelve dominante con el fuerte desarrollo del aparato masticador. La cara superior está casi desolidarizada del cerebro, al que está unida por un pequeño cuello óseo. Los seres humanos, en cambio, han mantenido el atractor neural durante un tiempo mayor, lo que implica una cerebralización fetal más importante; en cambio, el atractor facial, masticador, queda retardado. Estaríamos, por lo tanto, ante una lógica que se diferencia de una microevolución adaptativa.

El proceso de hominización conserva una trayectoria fundamental que acelera la intervención de ciertos atractores y retrasa otros, aunque con la presencia permanente de la rotación espiral, la prolongación del desarrollo neural, el retraso del desarrollo frontofacial y la prolongación del equilibrio psicomotor bípedo. Así pues, en el estado embrionario, *Sapiens* posee un atractor de 60 millones de años de antigüedad, pero el nivel dinámico se ha elevado considerablemente y la complejidad de la organización se ha incrementado.

Así concebida, la hominización no procede gradualmente por pequeños

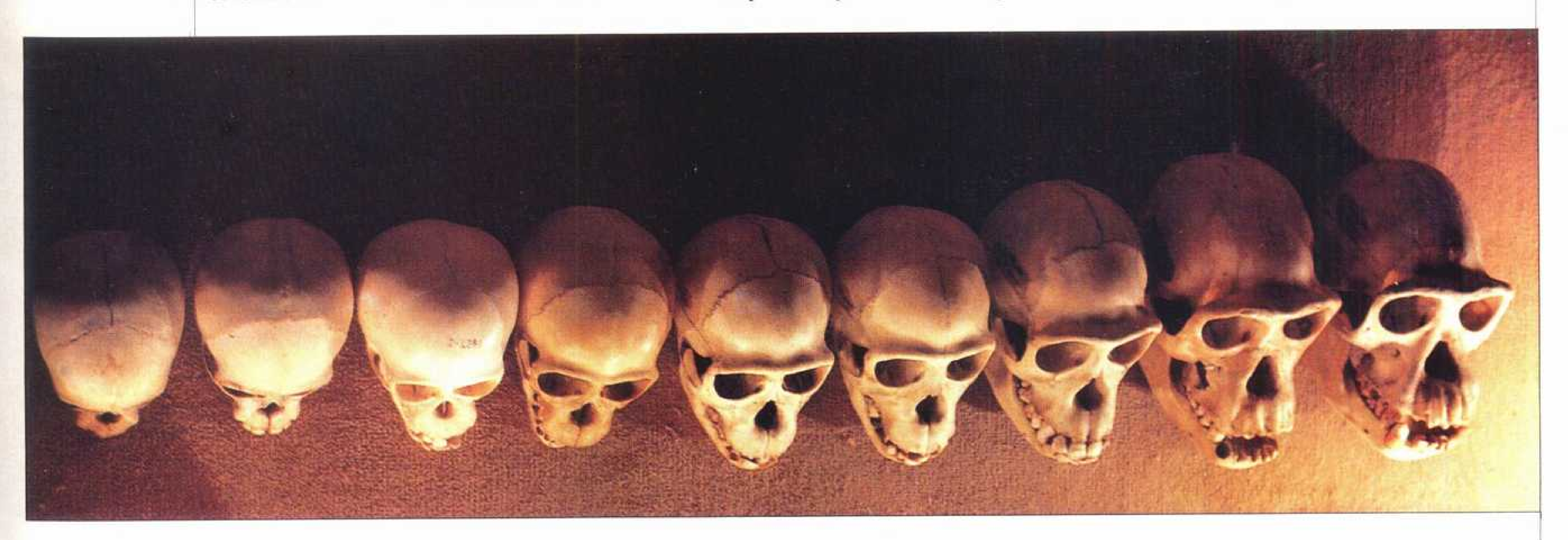


Figura 11. Estos cráneos de chimpancé muestran el paso de un estadio infantil, con un polo cerebral dominante, al estadio adulto, en el que la cara está desarrollada. Se ve aparecer la barra ósea encima de los ojos, un abultamiento creciente que aísla la cara del cráneo cerebral. Al tiempo, el maxilar y la mandíbula crecen hacia delante y el canino se convierte en colmillo.

CARIOTIPO Y EMBRIOGÉNESIS

El parentesco histórico del hombre actual (hominino) con los tres grandes simios actuales, el orangután (pongino) en Indonesia, y el chimpancé y el gorila (paninos) en África, se desprende de la comparación de cariotipos. Los tres grandes simios tienen 48 cromosomas, mientras que el hombre tiene sólo 46. Comparándolos uno a uno, se constata que el hombre posee en realidad dos cromosomas de gran simio unidos por los extremos, de tal modo que forman uno solo. En un mismo cromosoma formado por dos ramas, se observan desplazamientos de segmentos enteros que se producen durante el apareamiento de los lotes paterno y materno. Estos segmentos están invertidos en la misma rama o introducidos en la otra. El cariotipo más alejado del hombre es el del orangután, lo cual corrobora los datos de la paleontología, que sitúa en torno a los 18 millones de años el aislamiento euroasiático de los antepasados de los pónginos a partir de la cepa africana. Viene luego el cariotipo del gorila y finalmente el del chimpancé, el único que posee algunas modificaciones cromosómicas en común con el hombre.

Es problemático establecer una correlación entre las modificaciones macroscópicas de los cariotipos y los mecanismos de reestructuración embrionaria. El que el cariotipo del hombre sea el más parecido al del chimpancé indica que el ancestro del chimpancé fue temporalmente muy próximo al ancestro del australopiteco. Ahora bien, la situación es muy distinta desde el punto de vista de la embriogénesis. La del chimpancé es muy parecida a la del orangután; en cambio, entre la embriogénesis de tipo «gran simio» y la del hombre actual, se interponen al menos tres embriogénesis distintas: la de los primeros hombres de anatomía antigua y la de los primeros cromañoides del Próximo Oriente y de África.



Distribución filética según los cariotipos

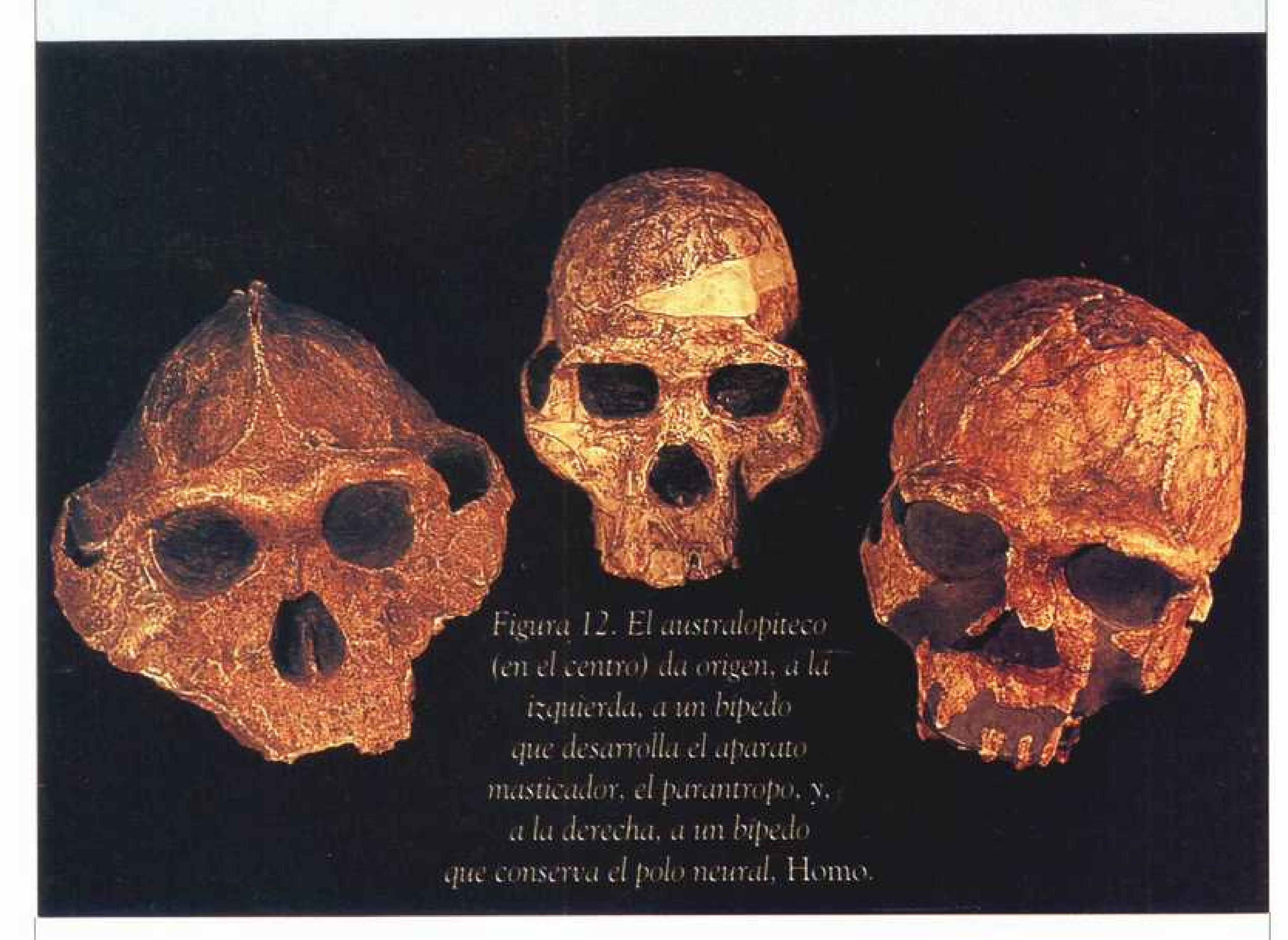


Figura 12. El australopiteco (en el centro) da origen, a la izquierda, a un bípedo que desarrolla el aparato masticador, el parantropo, y, a la derecha, a un bípedo que conserva el polo neural, Homo.

retoques de un único plan embrionario inicial, como pretende el esquema tradicional. Estamos ante una macroevolución, con evoluciones discontinuas de planes de organización embrionarios. Cuanto mayor es el número de descubrimientos que se acumulan, tanto menor lo es el de eslabones perdidos microevolutivos que se encuentran. La capacidad craneana es un dato tardío del desarrollo y, por lo tanto, es engañosa: los cráneos con grandes cerebros no corresponden a los embriones más contraídos. A pesar de sus 1.700 ml de capacidad craneana, el neandertal es el menos contraído de todos los hombres de anatomía antigua: embriológicamente no es un *Sapiens*.

La aparición del hombre, o del australopiteco, es posible porque en los umbrales límite de inestabilidad la embriogénesis posee una memoria genérica de las trayectorias de crecimiento que es conservada cuando el sistema cambia de estado de equilibrio. Los atractores fundamentales de la hominización no están en el medio. Por supuesto, el azar y la selección desempeñan un papel, aunque no bastan por sí solos para construir un australopiteco a partir de un simio. Es necesario tener en cuenta, además, un determinismo interno reproductible. Con una perspectiva de 60 millones de años, los hechos indican la existencia de un tipo de atractor extraño que escapa a los efectos de desviación no predecibles.

Queda la cuestión de las relaciones entre la dinámica evolutiva y el DNA. Los autores que introducen la dinámica en la morfogénesis subrayan la dificultad de comprender sus vínculos con las mutaciones genéticas. Los modelos propuestos son bastante diversos.[28-32] Pero todos ellos coinciden en el hecho de sacar el concepto de programa genético de su marco molecular nuclear y extenderlo a la escala de la célula.

Los genes muy precoces del desarrollo aportan nuevas informaciones; no obstante, como advierte Walter Gehring, la cuestión queda aplazada: ¿qué regula el regulador mutado?[30][II] Teóricos como René Thom, Ilya Prigogine y Marcel-Paul Schützenberger[38,39,40][III] insisten en la actualidad en el silencio del modelo de la mutación genética aleatoria ante los procesos creadores de orden. La relación entre la constitución molecular del DNA y la emergencia del orden es desconocida. Así pues, está a punto de transformarse el discurso sobre los mecanismos evolutivos. Como paleantropóloga, no pierdo de vista que las implicaciones principales conciernen a nuestros hijos, no a nuestras teorías.

A.D.-M. ■

Para más información

■ P. Bergé, Y. Pomeau y C. Vidal, *L'Ordre dans le chaos*, Hermann, 1984.
■ A. Boutot, *L'invention des formes, Chaos, catastrophes, fractales, structures dissipatives, atracteurs étranges*, Odile Jacob, 1993.
■ J. Chaline, *Une famille peu ordinaire, du singe à l'homme*, Seuil, 1994.
■ W. D'Arcy Thompson, *Forme et croissance*, Seuil, 1994.
■ P. Delattre, H. y R. Fenart, *L'Hominisation du crâne*, Editions du CNRS, 1960.
■ Ch. Devillers, J. Chaline, *Evolution. An evolving theory*, Springer Verlag, 1993.
■ J.L. Heim, *De l'animal à l'homme*, Le Rocher, 1988.
■ E. Laszlo, *Evolution, The Grand Synthesis*, Hambala Boston y Londres, New Science Library, 1987.
■ B. Mandelbrot, *Les Objets fractals, survol du langage fractal*, 3ª ed., Flammarion, 1989.
■ D. Starck, «The Development of the chondocranium in primates» *in Philogeny of the Primates*, Luckett (ed.), Szalay, 127-155, Plenum Publishing Corporation, 1975.

CUANDO LOS LÍQUIDOS DESMOJAN

Françoise Brochard-Wyart

Unas superficies secas, supersecas, que se han secado sin secarse

FRANÇOISE BROCHARD -WYART, Instituto Curie (URA 1379 del CNRS), París.

El desmojado, nacimiento sin evaporación de regiones secas en una superficie inicialmente mojada, fascina a los físicos y provoca —o encanta— a los industriales. El fenómeno, de gran riqueza teórica, depende tanto del líquido como del sustrato sobre el que descansa.

Cuando uno sale del baño, se produce un fenómeno banal pero curioso: el agua que cubre la piel mojada se redistribuye muy deprisa y aparecen unas zonas secas de extensión cada vez mayor. Este fenómeno de «desmojado», como le llaman los físicos, interviene en muchas situaciones prácticas. Aunque su estudio científico es reciente, los investigadores han logrado ya comprender algunos de los mecanismos que rigen la retracción de las películas líquidas.

La escuela francesa ha desempeñado un papel pionero en la materia. El tema del desmojado nació por casualidad en 1988 durante un seminario sobre las capas de jabón dado por Pierre-Gilles de Gennes en el Collège de France (París). Cuando se sumerge un marco en agua jabonosa y se lo vuelve a sacar, se forma una película de jabón bordeada por el marco. Al escurrirse el agua, la película adelgaza y aparecen unos «agujeros negros», que Isaac Newton había identificado ya como unas zonas tan finas que dejaban de reflejar la luz. De Gennes modelizó el crecimiento de estas películas delgadas dentro de otras más gruesas.[1] La región más delgada queda rodeada por un anillo que recoge el líquido. Para formar el anillo, el agua se escurre entre las paredes de la película, formadas por moléculas de jabón.

Por pura fantasía, traspusimos lo que P. de Gennes explicaba sobre las películas de jabón a películas de líquido que mojan un sólido. El crecimiento de una zona negra en una película de jabón se convertía en la extensión de una región seca sobre una superficie mojada. Esta simple idea ha llevado a nuestro equipo, del Instituto Curie, a descubrir que el desmojado es un fenómeno mucho más rico de lo que cabría pensar. Nos ha llevado también a establecer colaboraciones con distintos socios industriales, ampliando así nuestros objetivos iniciales. El desmojado, en efecto, tiene múltiples aplicaciones. El fenómeno es útil cuando se desea secar rápidamente una superficie, especialmente cuando se quiere evitar el depósito de polvo. Un secado usual por pura evaporación deja la suciedad en su posición inicial. En el desmojado, en cambio, el movimiento del fluido las arrastra. Por ello, los productos de aclarado de los lavavajillas están formulados de tal modo que tenga lugar un desmojado espontáneo del agua durante el secado.

Otro ejemplo: a los aviones, antes de despegar, se les rocía con un líquido que los convierte en no mojantes. Este tratamiento impide la aparición de una película continua de agua susceptible de desencadenar la formación de escarcha, la cual lastra el aparato y puede provocar su caída. Y cuando se circula por una carretera mojada, el frenado sólo es eficaz si la película de agua, que hace las veces de lubrificante, tiene tiempo de desmojar. La comprensión de las leyes del desmojado ayudaría a mejorar los revestimientos viarios.

Inversamente, ciertos métodos industriales consisten en extender películas líquidas, en cuyo caso hay que evitar el desmojado. Tal es el caso de las cintas adhesivas, donde el pegamento debe cubrir uniformemente la superficie sin dejar agujeros. El problema es el mismo para ciertos tratamientos destinados a los cultivos. Estos productos están formulados a partir de una base acuosa, pero las hojas de las plantas son muy hidrófobas. Hay que añadir, pues, sustancias que permitan reducir el efecto de desmojado.

Para comprender las leyes del desmojado, empecemos por algunas ideas básicas. Una gota de agua colocada sobre una placa de vidrio perfectamente limpia se extiende completamente. Se dice que se está ante una situación de mojado total. En cambio, colocada encima de una hoja de plástico, la gota forma un casquete esférico, con un cierto ángulo de contacto entre el agua y la superficie sólida (mojado parcial).

El comportamiento adoptado por el líquido (mojado total o parcial) puede caracterizarse por el llamado «coeficiente de extensión» S. Introducido en 1915 por dos agrónomos americanos, W. Cooper y W. Nuttal, que se interesaban por el depósito de insecticidas sobre las hojas, este coeficiente mide la diferencia de energía, por unidad de superficie del sólido, entre el sólido seco y el sólido mojado.

En el equilibrio, el estado privilegiado es, como siempre, el de energía mínima.

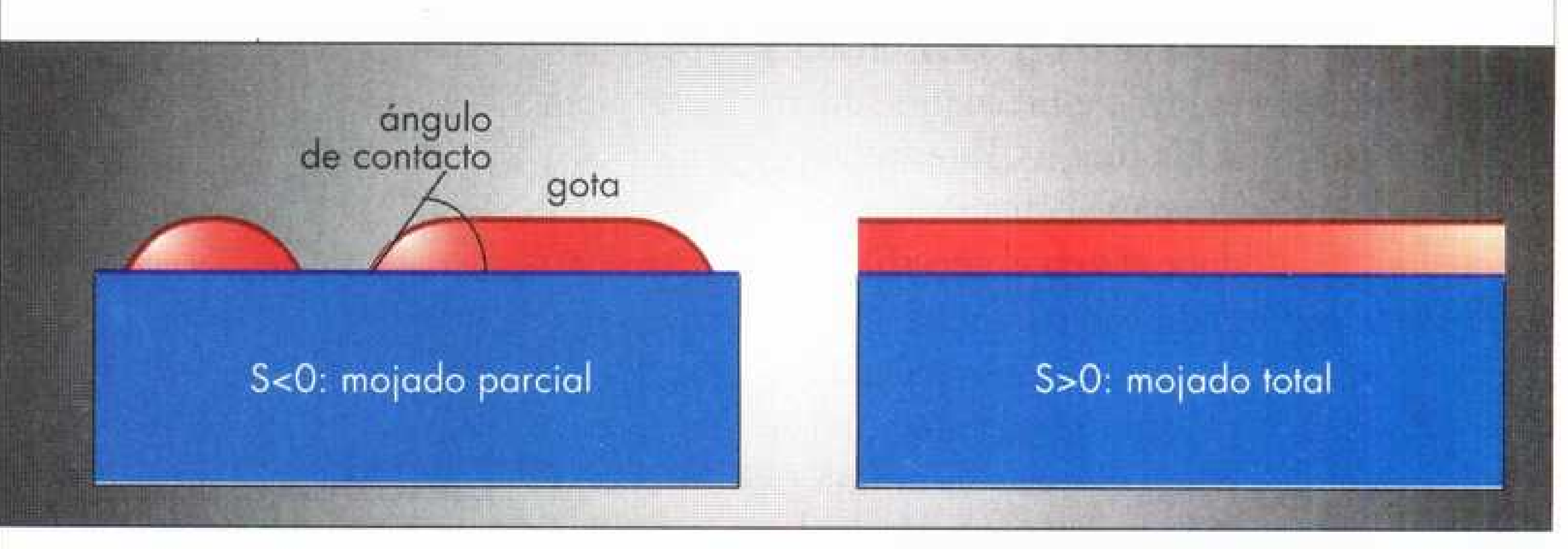
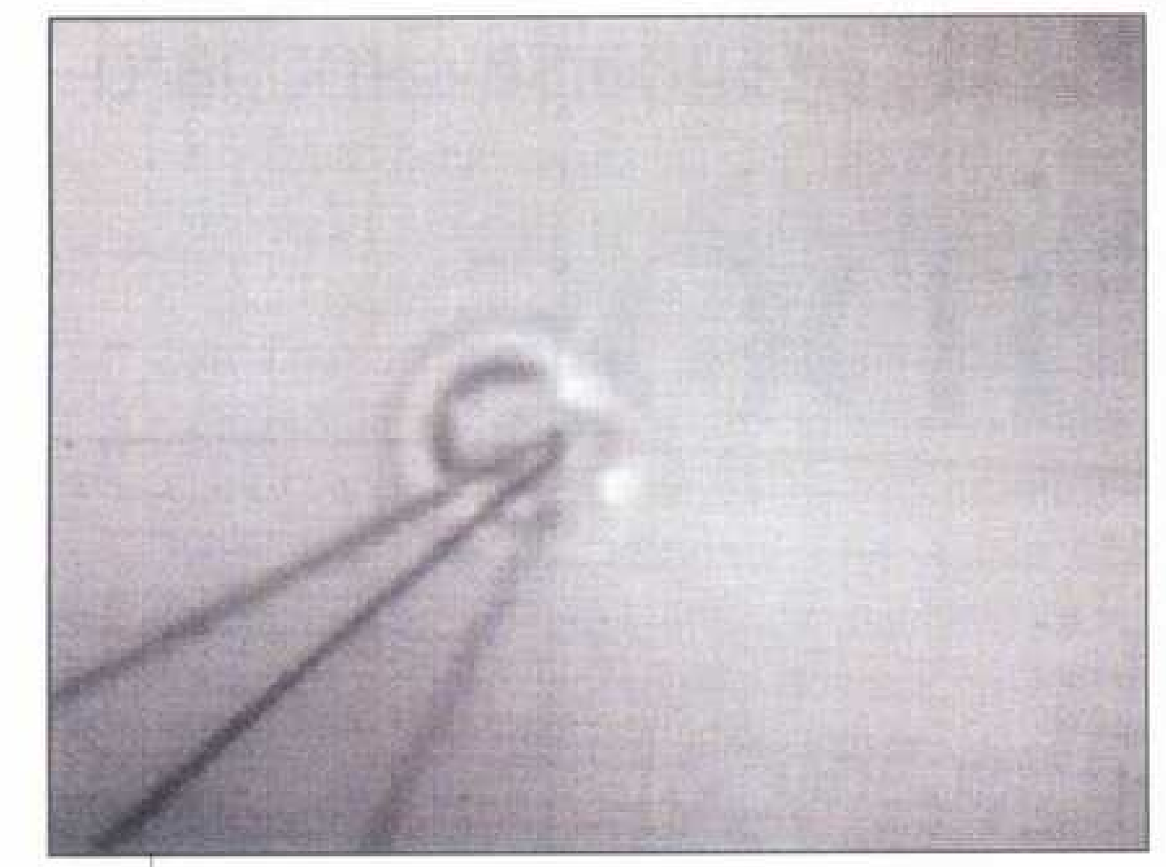
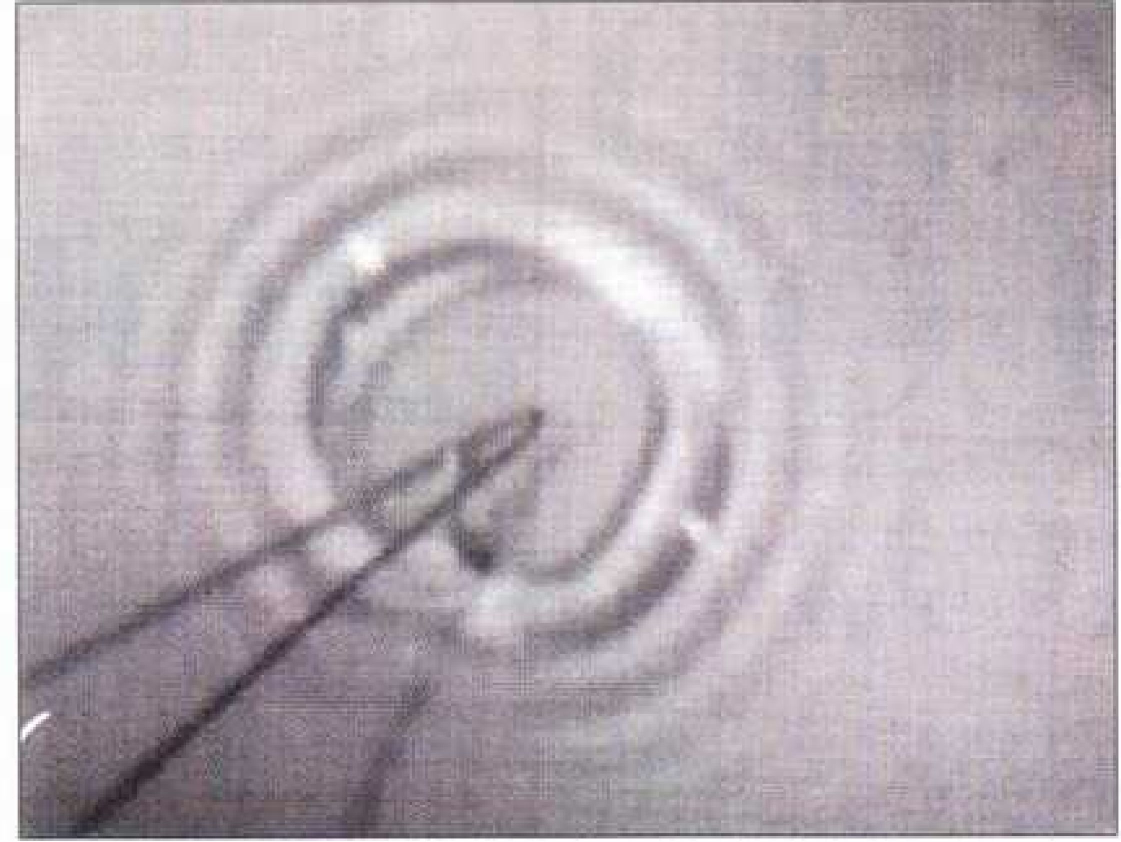
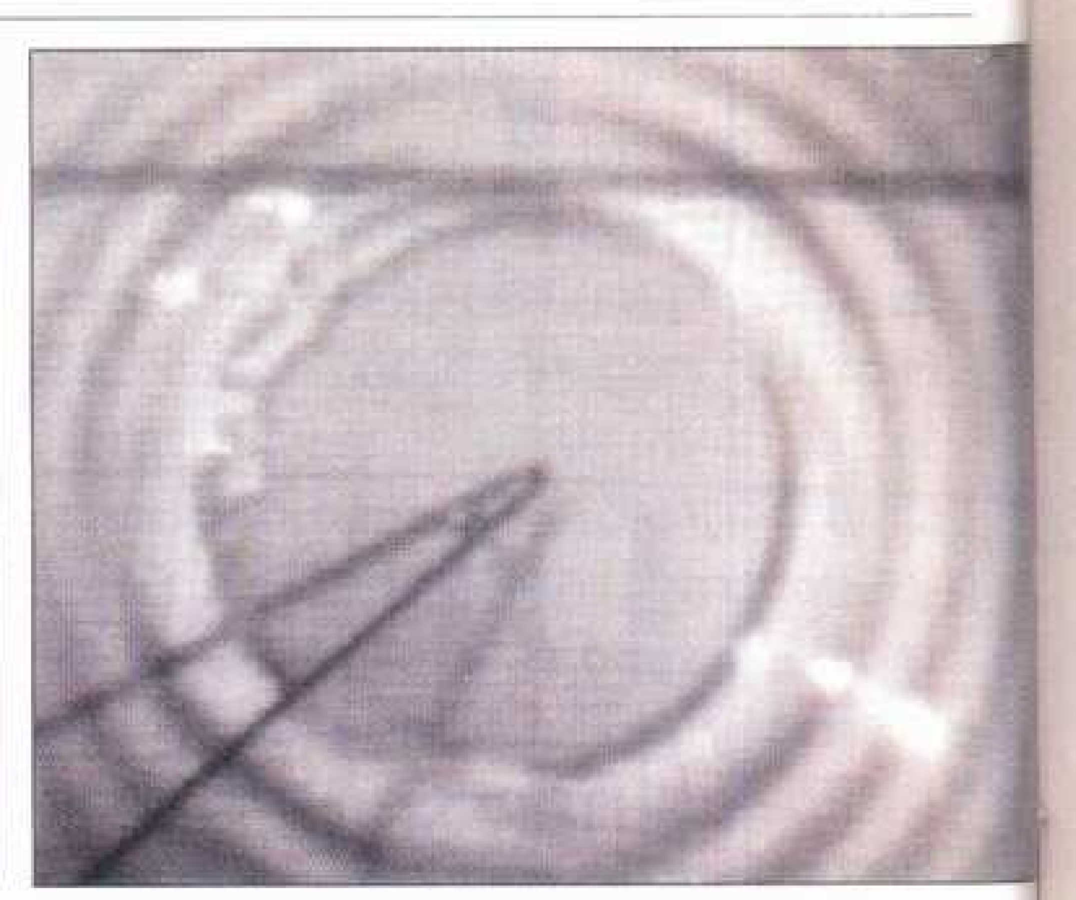


Figura 1. El coeficiente de extensión S *mide la diferencia de energía entre la superficie seca y la superficie mojada. Como el estado de equilibrio corresponde a la energía más baja, el líquido se extiende completamente si $S > 0$ y parcialmente si $S < 0$.*

Conociendo el coeficiente S se puede prever de antemano si el líquido va a extenderse o no sobre la superficie (fig. 1). Cuando $S > 0$, la energía de la superficie seca es mayor que la de la superficie mojada. El sólido reduce, pues, su energía recubriéndose con una película líquida que la moja por completo. Si $S < 0$, en cambio, el sólido prefiere mantenerse seco y la gota sólo se extiende parcialmente.

En una situación de mojado parcial, una película líquida colocada sobre una superficie sólo es estable si es lo bastante

(1) P.-G. de Gennes, *C.R. Acad. sci. (Paris) II*, 303, 1275, 1986.

pesada, es decir, si su espesor rebasa un cierto valor, generalmente del orden del milímetro. Por encima de este espesor crítico, la película es inestable y se descompone más o menos espontáneamente en gotas. Este fenómeno de desmojado puede estudiarse en varios casos, según la naturaleza de la película líquida y de la superficie sobre la que descansa.

Pese a su simplicidad, los primeros experimentos cuantitativos sobre desmojado no se realizaron hasta 1991

La situación de referencia es el desmojado de una película viscosa colocada sobre un sustrato sólido. Un experimento fácil de realizar requiere un retroproyector, una superficie transparente, ácido sulfocrómico y agua a la que se ha añadido glicerina para aumentar su viscosidad. La superficie transparente sirve de sustrato; en ella se dibuja un anillo mojante por medio de un vidrio sumergido en ácido sulfocrómico. Este anillo permite adherirle una película de agua con glicerina: se deposita en el centro una pequeña cantidad de agua y se la aplasta de modo que se apoye en el anillo. Se realiza así una película metastable que se apoya en su borde circular. Con una pipeta se aspira líquido del centro, lo cual crea un orificio en el líquido. Si es inicialmente lo bastante grande,[2] esta zona seca sigue extendiéndose y basta entonces con filmar el proceso.

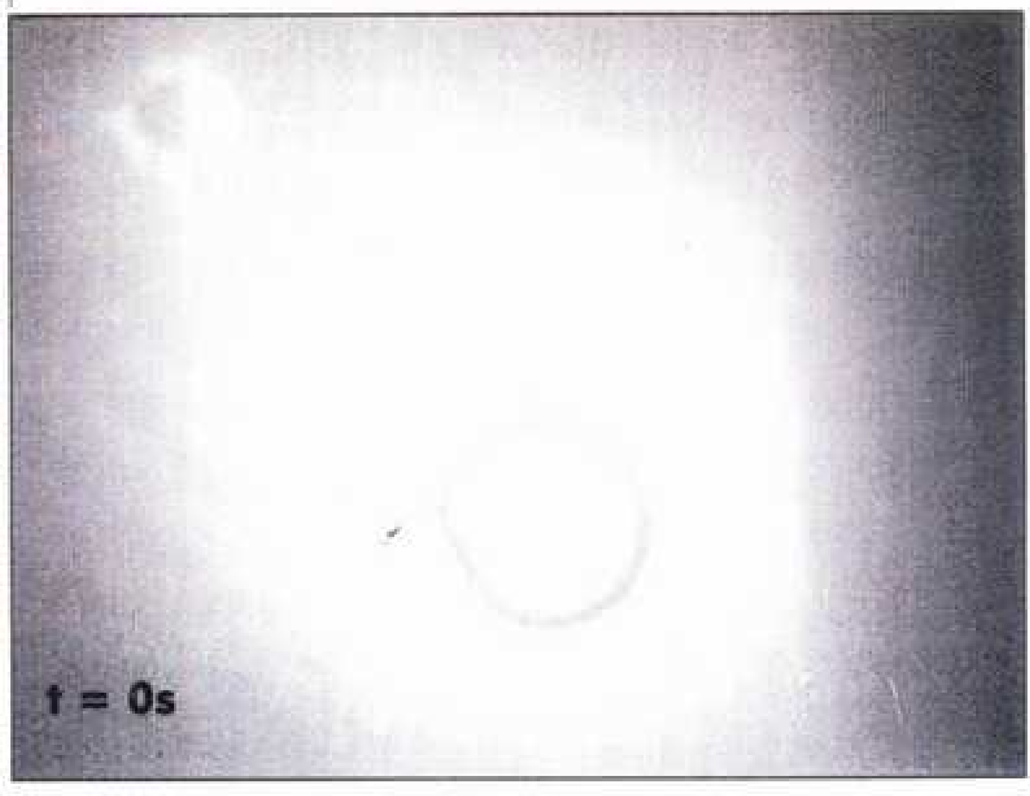
Nuestros primeros experimentos cuantitativos de desmojado fueron realizados en 1991 con otro sistema, mejor controlado.[3] El sustrato está formado por una pastilla de silicio lisa a escala atómica (como la que se utiliza para grabar circuitos microelectrónicos) que se tapiza con una capa molecular compacta (de silanos fluorados o hidrogenados). Se realiza así una superficie hidrófoba, muy parecida a la del fondo de una sartén de Teflon pero mucho más regular. Se forma sobre dicha superficie un anillo mojante destruyendo, por medio de un láser, el tapiz molecular en la periferia de la pastilla. Luego, se depositan películas de aceite de siliconas y de hidrocarburos por un método clásico: se coloca la pastilla de silicio sobre una platina en rotación, del tal manera que la fuerza centrífuga extienda la gota en una fracción de segundo. Luego, por aspiración, se crea un agujero en el centro de la capa líquida.

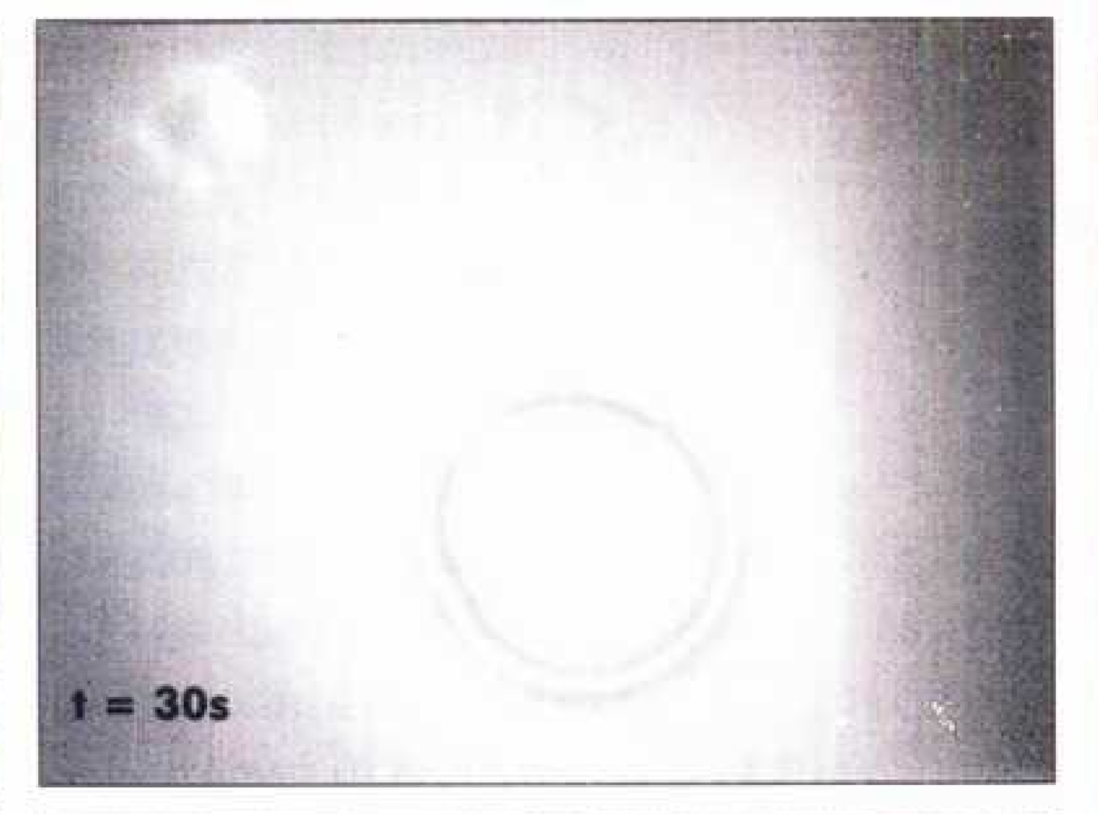
Los aceites de siliconas tienen la ventaja de presentar viscosidades muy variables. El interés de los hidrocarburos, por su parte, estriba en que distintos hidrocarburos dan lugar a diferentes ángulos de contacto. La observación y la medida de la velocidad de apertura en función de la viscosidad y del ángulo de contacto conducen a las leyes del desmojado viscoso: 1) el agujero se abre a velocidad constante: su radio es proporcional al tiempo transcurrido; 2) el agujero queda rodeado por un anillo (figs. 2 y 3) que recoge el líquido; 3) la velocidad de desmojado crece rápidamente con el ángulo de contacto (como el cubo de dicha magnitud).

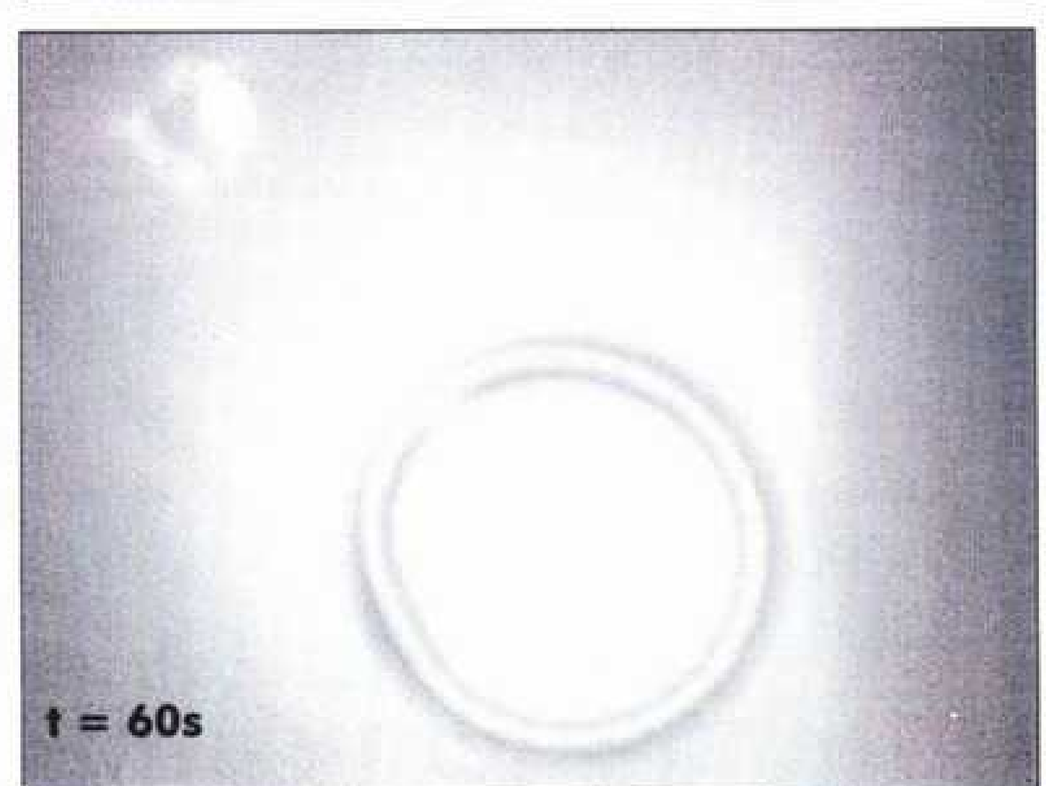
En el caso del agua, esta velocidad es del orden de los 100 m/s. En los polímeros viscosos, es mucho menor, del orden del micrómetro por segundo. En cuanto al cubo del ángulo de contacto, es posible explicarlo, al menos para ángulos de contacto no demasiado grandes. La idea consiste en tener en cuenta, de una parte, la fuerza que tira del anillo, tanto menor cuanto más pequeño es el ángulo de contacto, y, de otra, la fuerza de rozamiento, tanto más importante cuanto menor es dicho ángulo.[4]

Lo anterior concierne al desmojado en régimen viscoso, donde toda la energía de superficie perdida por la región secada se disipa en forma de rozamiento, y por lo tanto, finalmente, en calor, por efecto de la viscosidad. No obstante, cuando la viscosidad de la película que moja es des-

Figura 2. Estas tomas de vídeo muestran el desmojado (en régimen inercial) del agua sobre un vidrio muy hidrófobo. El anillo que recoge el líquido alrededor de la región seca presenta unas ondas capilares que posiblemente frenan el movimiento del anillo. (Fotos L. Vovelle.)







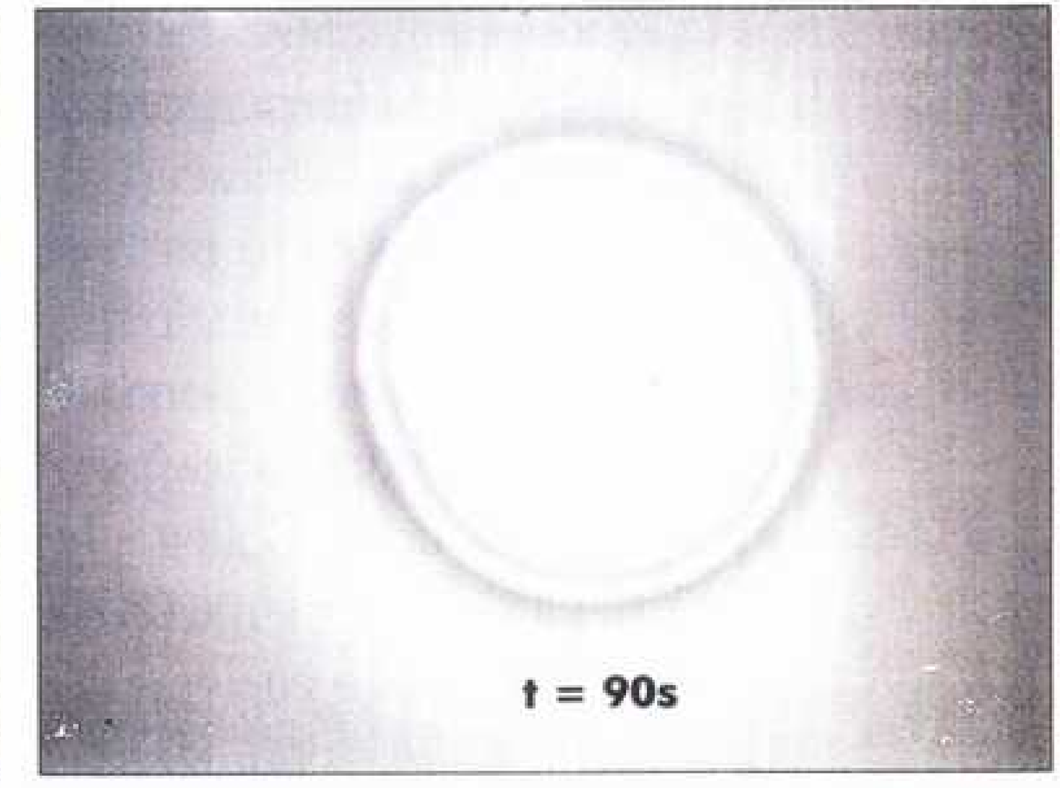


Figura 3. Desmojado de un líquido (película de aceite de silicona) depositado sobre otro (aceite de silicona fluorado). Los dos líquidos no son miscibles. Al ser muy lisa la interfase, los agujeros que se abren son circulares. (Fotos P. Martin y A. Buguin.)

(2) C. Sykes *et al.*, *J. Phys. III*, 4, 775, 1994.
(3) C. Redon *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 66, 715, 1991.
(4) L. Andrieu *et al.*, *C.R. Acad. Sci. (Paris)*, 320, 351, 1995.

preciable, el desmojado sigue otro régimen, con una velocidad de desmojado relativamente elevada. En tal situación, la energía de superficie no se disipa en rozamientos sino que se transforma, debido al arrastre del líquido, en energía cinética. Para describir el movimiento del anillo, pues, hay que recurrir a dos magnitudes: la energía superficial perdida en razón de la apertura del orificio, y la energía cinética adquirida por el líquido arrastrado. Ello conduce a una ley teórica según la cual la velocidad de apertura vale $\sqrt{(S/\rho e}$, donde ρ es la densidad del líquido, e el espesor de la película y S el ya mencionado coeficiente de extensión. Esta ley es casi idéntica a la relación, verificada desde hace tiempo, que describe la rotura de las pompas de jabón.[5] Lo cual no tiene nada de sorprendente: al estar suspendidas en el aire, las películas de jabón también presentan poco rozamiento.

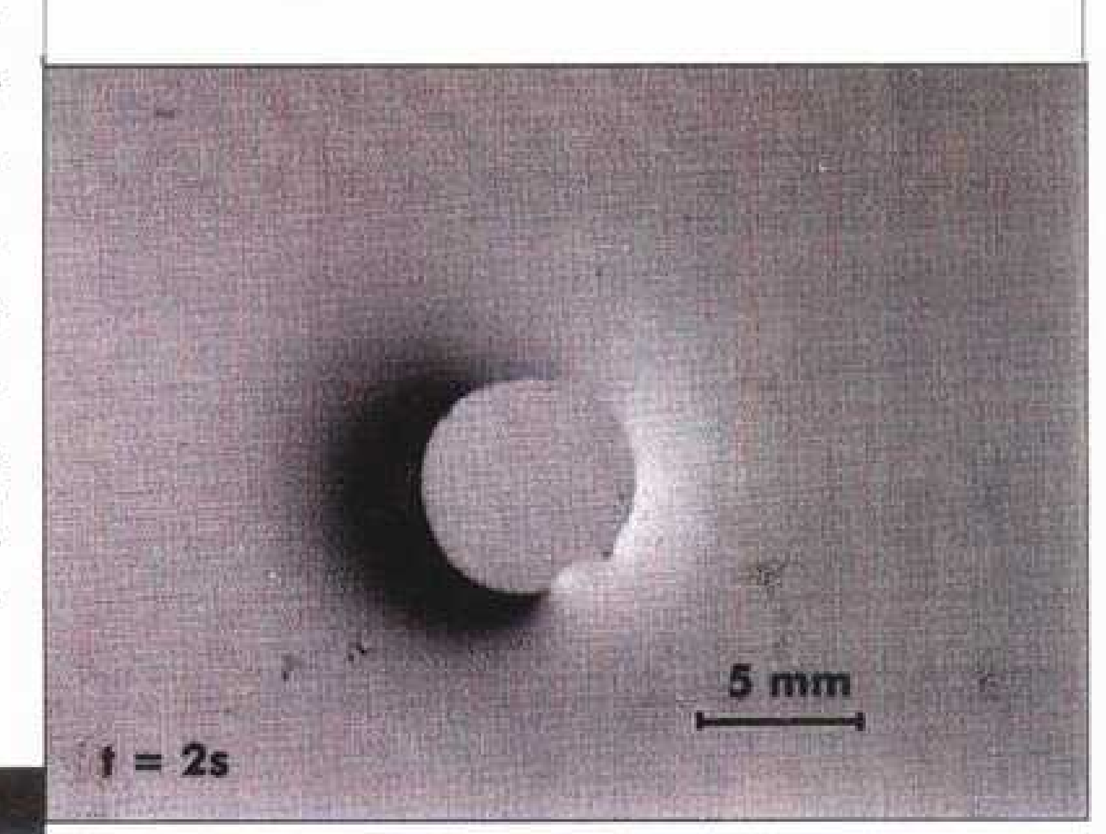
(5)
W.E. Ranz, *J. Applied Phys.*, 30, 1950, 1959.
(6)
F. Brochad-Wyart, *J. Phys. France*, 3, 21, 1993.
(7)
P.J. Nacher y J. Dupont-Roc, *Phys. Rev. Lett.*, 67, 296, 1991.
(8)
P. Martin *et al.*, *Europhysics Letters*, 28, 421, 1994.
(9)
C. Redon *et al.*, *Macromolecules*, 27, 468, 1994.
(10)
G. Debrégeas *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 75, 3886, 1995.
(11)
A. Carré y M. Shanahan, *Langmuir*, 11, 3572, 1995.

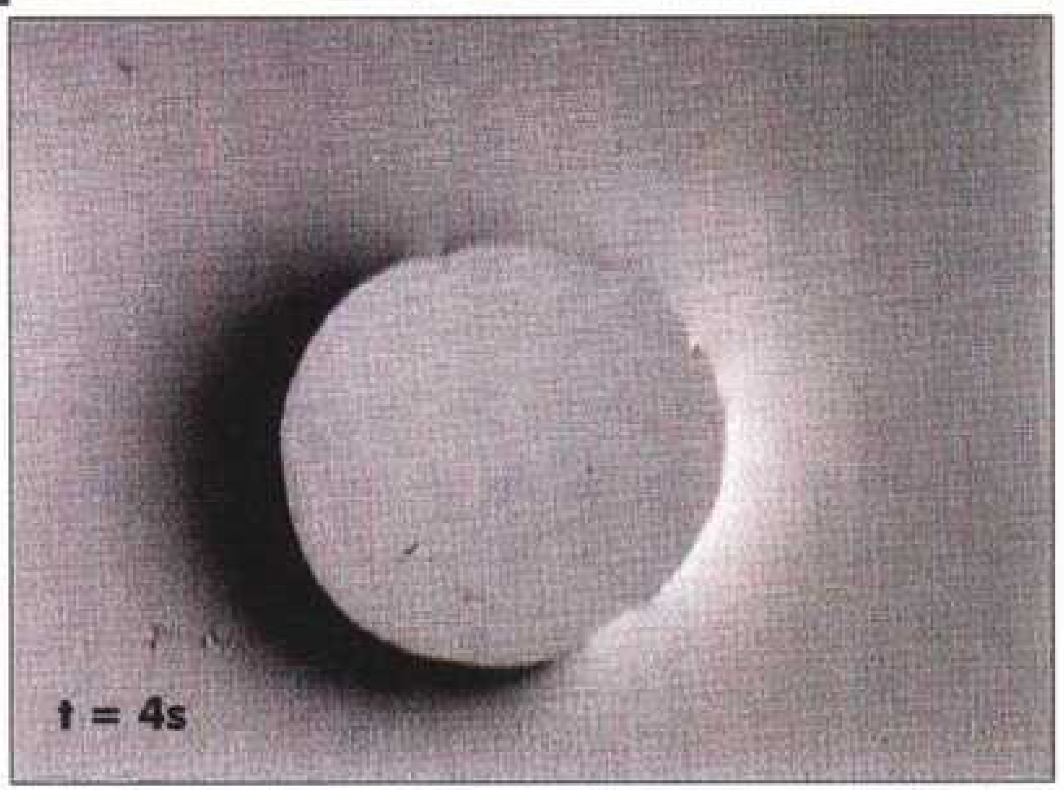
Las múltiples combinaciones entre líquido y sustrato dan lugar a gran cantidad de aplicaciones industriales

En 1993, observamos el régimen inercial sin más que examinar el desmojado de una película de agua bastante gruesa sobre superficies plásticas muy hidrófobas.[6] El agua desmoja aquí a velocidades de unos 10 cm/s y la ley que vincula la velocidad del anillo con el espesor de la película ha sido verificada con bastante exactitud. Así, como ha constatado Louis Vovelle, de los laboratorios de Rhône-Poulenc, en Lyon, pueden aparecer ondas durante el desmojado del agua sobre un vidrio muy hidrófobo (fig. 2): el agujero que se abre emite unas ondas capilares que lo acompañan a la misma velocidad.

Un modelo ideal de desmojado inercial podría corresponder al helio superfluido. Este líquido, obtenido a una temperatura próxima al cero absoluto, carece prácticamente de viscosidad. En él, los mecanismos de disipación de energía son raros. Además, se han hallado recientemente excepciones cuando el helio superfluido se extiende completamente por todo el sólido;[7] en ciertos intervalos de temperatura, el cesio y el rubidio sólo se mojan parcialmente. Se pueden buscar allí, pues, fenómenos de desmojado. Sébastien Balibar realiza actualmente experimentos en este sentido en la Escuela normal superior de París.

Las dos situaciones descritas hasta aquí (películas viscosas o no viscosas que mojan un sólido) no son las únicas posibles. Hemos explorado otras, más raras. Una de ellas es el desmojado de aceites de siliconas depositados no sobre un sólido sino sobre otro líquido, en nuestro caso aceites de siliconas fluorados; este caso fue estudiado en 1994 por Pascal Martin y Axel Buguin.[8] Los dos aceites no son miscibles, por lo que una interfase muy nítida los separa. Para el estudio del desmojado, este tipo de superficie es ideal, ya que es mucho más lisa que una superficie sólida. Así lo atestiguan los agujeros secos, perfectamente circulares (fig. 3). No obstante, hay que tener en cuenta ahora los flujos líquidos inducidos en el sustrato por el movimiento de la película





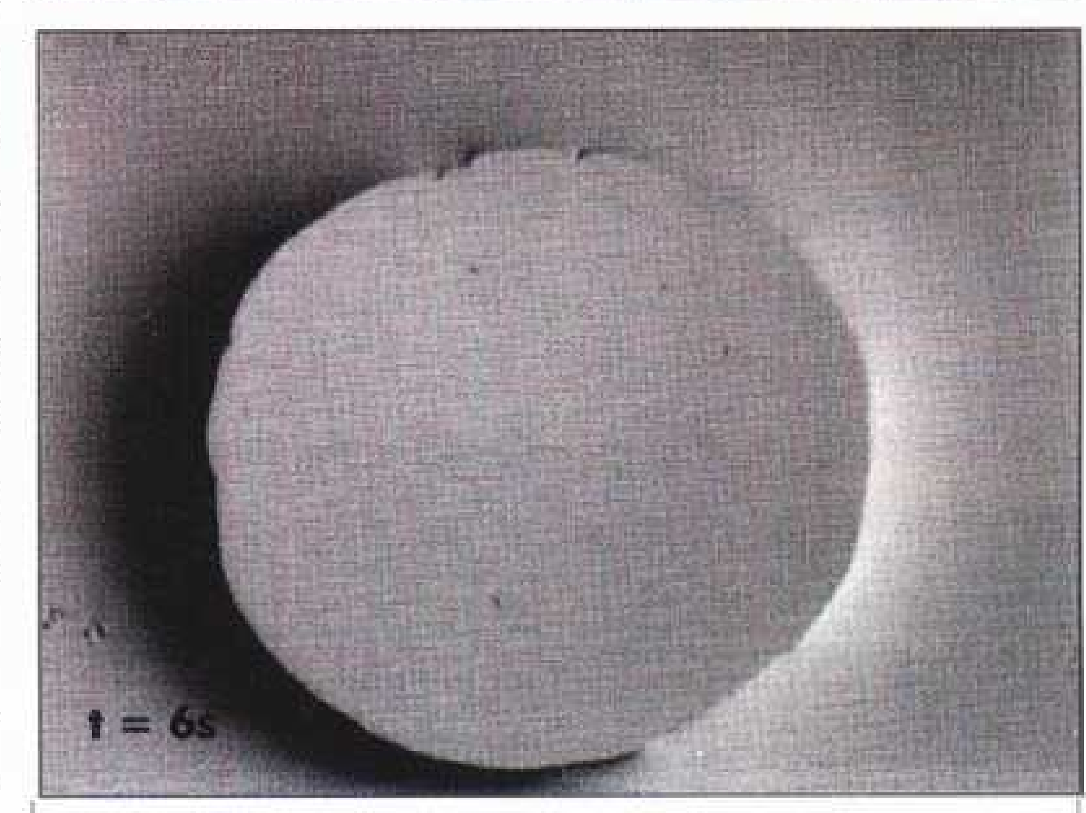


Figura 4. Desmojado de una película de agua *sobre un caucho muy blando. En la periferia del agujero seco, las fuerzas capilares deforman el caucho. La disipación de energía resultante frena el proceso de desmojado. (Fotos A. Carré y M. Shanahan.)*

líquida. Mientras la viscosidad de esta última no sea demasiado grande, la velocidad de desmojado es constante y depende sólo de la velocidad del líquido soporte.

Otro caso interesante es el desmojado de una pasta muy viscosa sobre un sustrato sólido. Los polímeros fundidos muy viscosos no fluyen como los líquidos ordinarios. Sobre una superficie lisa y pasiva, es de esperar que el polímero fluya como un líquido normal si la película que moja es relativamente gruesa, pero también que resbale en bloque, como un sólido, si es muy delgada. En este último caso, toda la disipación de energía ocurre en la interfase sólido-líquido. Se encuentra entonces que el radio del agujero seco debería crecer proporcionalmente a la potencia 2/3 del tiempo, cosa que han confirmado los experimentos realizados en 1993 por Claude Redon con aceites de siliconas muy viscosos que cubren pastillas de silicio silanizado.[9]

Una tercera situación exótica estudiada en nuestro grupo, especialmente por Georges Debrégeas y Pascal Martin, es el desmojado de una pasta muy viscosa (aceites PDMS) sobre un sustrato líquido. Aparecen aquí unas propiedades enteramente nuevas debidas al comportamiento viscoelástico de la película.[10] Ningún anillo rodea el líquido y la velocidad de apertura del agujero aumenta exponencialmente con el tiempo.

El último caso exótico es el desmojado de un líquido usual sobre un soporte sólido muy blando (caucho poco reticulado), examinado recientemente por Alain Carré y Martin Shanahan, de la Escuela de minas de Evry.[11] En la línea de contacto que bordea el agujero de zona seca, el caucho queda deformado por la fuerza capilar a una escala de unos 10 nanómetros (fig. 4). Estas deformaciones móviles disipan energía, por lo que pueden frenar mucho el anillo. Como se ve, el desmojado tiene múltiples facetas según la naturaleza del líquido y del sustrato. Cabe clasificar dichos sistemas en dos categorías: el «desmojado viscoso», lento, en el que la energía de superficie se disipa por viscosidad en el anillo o en el sustrato; y el «desmojado inercial», rápido, en el que la energía de superficie se transforma en energía cinética del anillo de líquido.

Queda todavía mucho camino por recorrer antes de inventariar todos los estudios o aplicaciones del desmojado. Un ejemplo entre otros es el estudio del desmojado de una película líquida intercalada entre un sólido y un material deformable. Aparece también este problema en la impresión cuadricroma que produce nuestras magníficas revistas. El papel pasa a gran velocidad ante los rodillos que lo colorean de azul, luego de rojo, etc. En el momento de imprimir el azul, se protegen con una película de agua las partes destinadas a ser coloreadas de rojo. Cuando el papel llega al rodillo rojo es preciso eliminar muy rápidamente esta capa. El problema es similar al de los casos precedentes, pero difiere de ellos en que el papel aspira el agua. Interesantes desde los puntos de vista fundamental y aplicado, los distintos temas de investigación aquí mencionados tiene además la ventaja de no requerir gastos demasiado importantes y de prestarse bien a colaboraciones entre industriales e investigadores.

F.B.-W. ■

LOS GENES DE LA METAMORFOSIS

Yun-Bo Shi, Melissa Stolow, Monika Puzianowska-Kuznicka, Jiemin Wong

Una hormona, director de una orquesta de genes, dirige el remodelaje anatómico

JUN-BO SHI, MELISSA STOLOW, MONIKA PUZIANOWSKA -KUZNICKA, JIEMIN WONG trabajan en el laboratorio de embriología molecular del National Institute of Child Health and Human Development, en Bethesda (Maryland).

META-MORFOSIS en la mayor parte de los vertebrados (tiburones y rayas, reptiles, aves y mamíferos), la formación de los órganos típicos del adulto se efectúa durante una larga fase embrionaria que tiene lugar en el óvulo o en el útero materno (desarrollo directo). Cuando el desarrollo es interrumpido por una fase larvaria móvil (desarrollo indirecto), la metamorfosis es necesaria para transformar la larva en juvenil o en adulto. Es el caso de los anfibios, especialmente los anuros (ranas, sapos, rana de uñas, etc.).

TUNICADOS animales marinos solitarios o coloniales que poseen, como los vertebrados, una cuerda dorsal, pero solamente en el estado larvario.

La metamorfosis de las larvas de batracios ha intrigado a generaciones de biólogos. Desde los años 1910, los biólogos saben que está desencadenada por una hormona que segrega la glándula tiroides. Su modo de acción ha sido descubierto recientemente gracias a la identificación de los receptores de la hormona. Son éstos los que controlan la actividad de varios genes, a veces con un efecto de retraso. Algunos de estos genes intervienen en la construcción de unas estructuras perfectamente determinadas e incluso en la síntesis de nuevos enzimas adaptados al modo de vida aéreo de los adultos.

La rana verde y el sapo común de nuestros campos nacen de un proceso extraordinario e irreversible: la metamorfosis, que modifica totalmente, en veinte días, la anatomía de la larva o renacuajo.[1] Sin ella, ranas y sapos serían renacuajos gigantes. Junto con otros anfibios, las lampreas y numerosos peces (salmones, anguilas, peces planos, peces coralinos) son los únicos vertebrados que sufren una metamorfosis,* a la manera de ciertos invertebrados tales como los gusanos anélidos, los crustáceos, las mariposas, las moscas, los erizos de mar o los tunicados.*

¿Podemos imaginar nuestros pulmones, nuestros riñones y nuestro aparato digestivo remodelados por un maremoto anatómico y fisiológico?

¿Cómo las branquias respiratorias del renacuajo, que vive en el agua, dejan paso a los pulmones del adulto, que suele vivir al aire libre, en las orillas de charcas y ríos? ¿Por qué misterioso mecanismo el tubo digestivo, adaptado a un régimen omnívoro en el renacuajo, pasa a especializarse y adaptarse a un régimen



únicamente carnívoro? ¿Desaparece la cola de la larva, que le sirve de propulsor acuático, porque ciertos enzimas la devoran, o lo hace a consecuencia de un mecanismo más secreto? ¿Por qué en el renacuajo las patas crecen tan aprisa, solo en algunos días? Pero, además, estas profundas remodelaciones anatómicas ocultan otros muchos cambios: fisiológicos, bioquímicos y genéticos. ¿Qué es lo que hace que los enzimas digestivos o los del aparato excretor difieran antes y después de la metamorfosis? ¿Cómo se adapta el pigmento respiratorio de la sangre, la hemoglobina, a las concentraciones diferentes de oxígeno que hay en el agua y en el aire?

Renacuajo y adulto de rana de zarzal meridional (Hyla meridionalis) *(sur de Francia y de España, África del Norte). Fotos Jacana y Aqua Press/M.P. y C. Pied Noir.*

Estas preguntas nos remiten al tema central de la biología del desarrollo, que siempre ha querido comprender cómo la fecundación de una simple célula femenina, el óvulo, da origen a un organismo complejo formado por millones de células diferentes. Desde hace siglos, los biólogos experimentan con diferentes animales para resolver este misterio. Los anfibios son los modelos de elección, los que se han utilizado desde más antiguo y de manera más profusa.

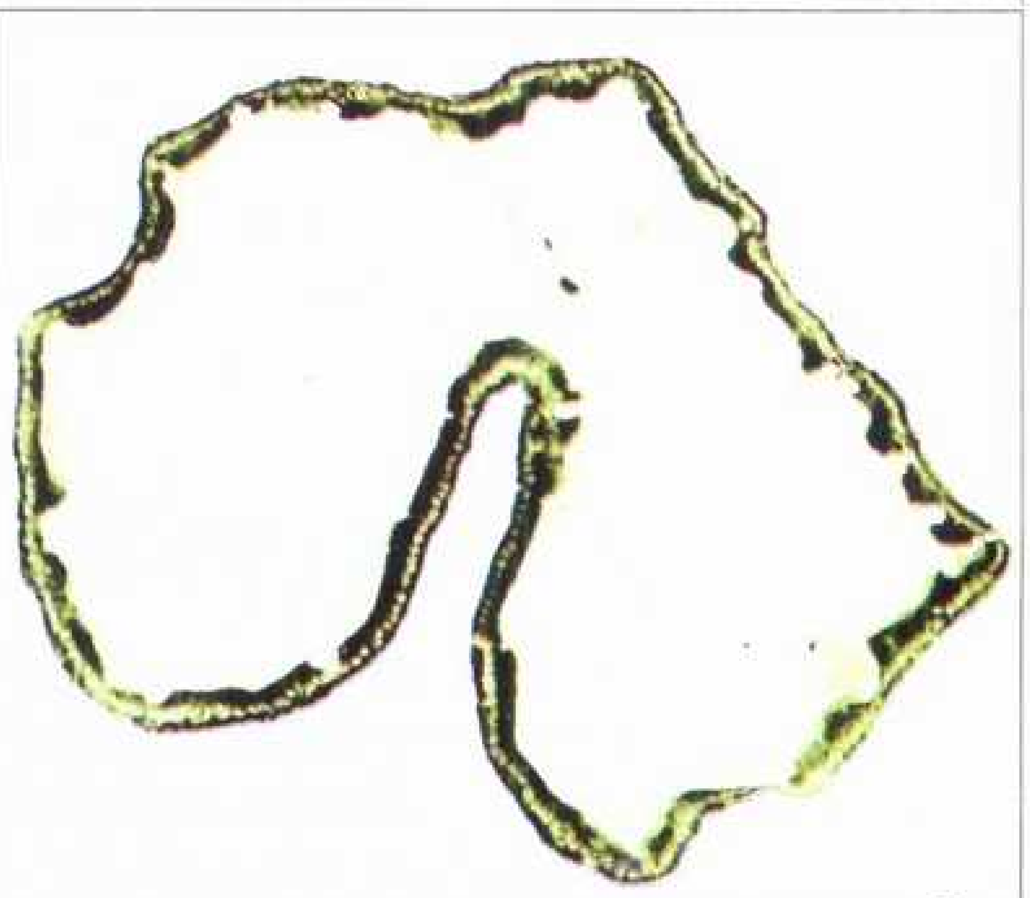
Todo el desarrollo de estos vertebrados, incluida la fecundación, tiene lugar fuera del cuerpo del animal, en el agua. El óvulo (fecundado o embrión) puede ser fácilmente manipulado y observado, ya que es entre diez y veinte veces mayor que el óvulo de ratón o el humano. El de la rana de uñas (*Xenopus laevis*), una rana sudafricana, alcanza un diámetro de 1 mm.* Las primeras divisiones del óvulo se pueden contemplar a simple vista. A medida que el desarrollo avanza, también pueden verse fácilmente los cambios morfológicos. Hay tiempo suficiente para hacerlo, ya que la duración de la fase larvaria varía entre dos y tres semanas en las pequeñas especies, y es de tres años en las mayores.

Uno de los primeros signos de la metamorfosis es que, en el renacuajo, las patas traseras toman forma a partir de células indiferenciadas de una capa celular, el blastema.* Su construcción dura, según la especie, de dos a seis semanas. En cambio, otros órganos de la larva quedan suprimidos. Así ocurre, por ejemplo, en la cola del renacuajo, cuya desaparición total empieza en el paroxismo de la metamorfosis. Ésta acaba una vez suprimida completamente la cola.

A diferencia de las patas y de la cola, la mayor parte de los órganos existen tanto en el renacuajo como en el adulto, aunque sufren una intensa remodelación. Por ejemplo, el intestino, largo tubo de estructura simple en el renacuajo herbívoro, se convierte durante la metamorfosis en un órgano corto y muy complejo (fig. 1). El epitelio intestinal de la larva, que efectúa la absorción de los nutrientes, degenera a causa de un proceso de muerte celular llamado apoptosis (del griego *apoptôsis*, caída de las hojas). Las células se «suicidan», en el sentido en que ponen en marcha un mecanismo interno de muerte programada por algunos de sus genes, lo que permite la proliferación y la diferenciación de las células más próximas.

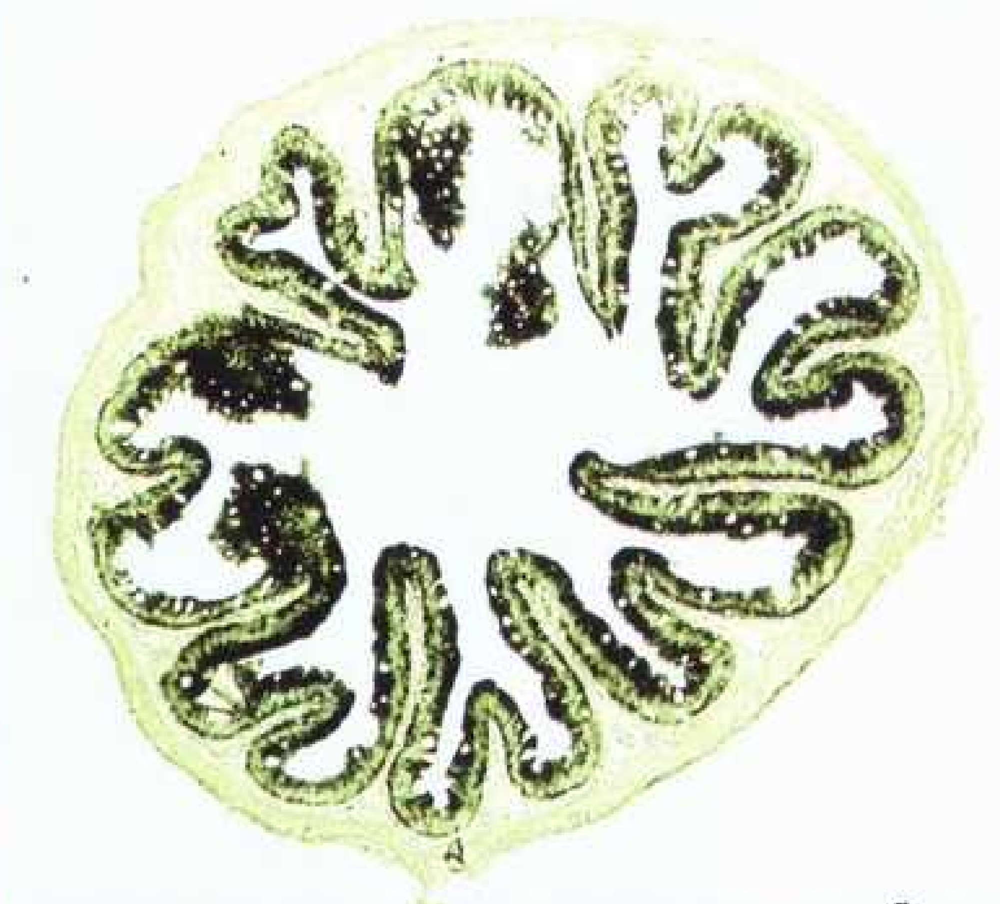
En realidad, cuando las células epiteliales del renacuajo mueren, las células características del intestino adulto, cuyo origen es desconocido, se multiplican rápidamente y se diferencian en células funcionales. En el mismo periodo, las células conjuntivas y musculares, que refuerzan el epitelio y están desparramadas por el intestino del renacuajo, proliferan. El efecto combinado de estos cambios da origen a un intestino adulto que comprende un epitelio de varias capas, parecido al de los vertebrados superiores.

La historia científica de la metamorfosis empieza realmente con el descubrimiento decisivo de un biólogo de la uni-



INTESTINO DEL RENACUAJO DE LA RANA DE UÑAS

Nuevo rostro para el intestino



INTESTINO DEL ADULTO DE LA RANA DE UÑAS

Figura 1. Durante la metamorfosis *el tejido que recubre la superficie interna del intestino degenera para dar lugar a un nuevo epitelio que segrega enzimas digestivos diferentes. El intestino del renacuajo tiene muy poco tejido conjuntivo subyacente y muy pocas células musculares (arriba), a diferencia del intestino del adulto (a la izquierda), y el epitelio larvario forma un solo pliegue, en la parte anterior del intestino, mientras que el epitelio adulto, muy sinuoso, tiene una superficie de absorción mucho mayor. (Fotos Dr. A. Ishizuya-Oka, universidad de Dokkio, Japón, según A. Ishizuya-Oka* et al., *Roux's Arch. Dev. Biol., 204, 150, 1994.)*

versidad de Munich, Friedrich G. Gudernatsch. En 1912, hizo que jóvenes renacuajos comieran diferentes órganos de caballo. Con gran sorpresa por su parte, observó que la glándula tiroides del animal, y sólo ella, provocaba en menos de una semana el paso de la fase larvaria a la fase adulta. En 1916, Bennet Allen, de la universidad de Kansas, y Philip Smith, de la universidad de California, demostraron que la simple ablación de la tiroides (tiroidectomía) podía impedir la metamorfosis y producir renacuajos gigantes.

Un año antes, el químico y fisiólogo norteamericano, Edward Calvin Kendall (futuro premio Nobel 1950), había aislado el agente activo de la tiroides, la hormona tiroidea. Demostró que esta hormona posee, en realidad, dos formas activas llamadas T_3 (tri-iodotironina) y T_4 (tiroxina). Se trata de unas pequeñas moléculas sintetizadas en la tiroides a partir de polipéptidos precursores. Ambas son capaces de inducir la metamorfosis, a pesar de que la T_4 es el precursor de la T_3 y de que esta última es la más activa.*

A continuación, diversos equipos de investigadores descubrieron que la concentración sanguínea de las hormonas tiroideas tiene relación con la metamorfosis (fig. 3). En la rana de uñas, la sangre del renacuajo contiene pocas hormonas antes del trigésimo día siguiente a la fecundación. Durante la «prometamorfosis» (comienzo de la metamorfosis, trigésimo al cuadragésimo cuarto día), las

XENOPUS LAEVIS llamado también rana de uñas o dactiletro de El Cabo. Se hizo célebre en 1931 cuando unos investigadores sudafricanos lo utilizaron para inventar el primer test de embarazo en la mujer.

BLASTEMA amasijo de células no diferenciadas pertenecientes al mesodermo, la hoja media del embrión primitivo.







Figura 2. En el renacuajo, *la larva de los anfibios, los signos más aparentes de la metamorfosis son la formación de las patas, las posteriores, seguida de las anteriores, y la desaparición de la cola. Aquí, las cuatro fases de esta evolución en el sapo partero* (Alytes obstetricans). *(Fotos Aqua Press/M.P. y C. Pied Noir.)*

¿UNA BISAGRA EN LOS VERTEBRADOS?

En los vertebrados, es típico oponer dos niveles de organización. El primero, que se observa en los peces, los adapta al medio acuático. El segundo, propio de los vertebrados superiores (reptiles, aves y mamíferos), los prepara para un hábitat terrestre. El desarrollo de muchos de los anfibios actuales es curioso, puesto que en el mismo animal se suceden los dos tipos de organización (*amphi*: doble; *bios*: vida).

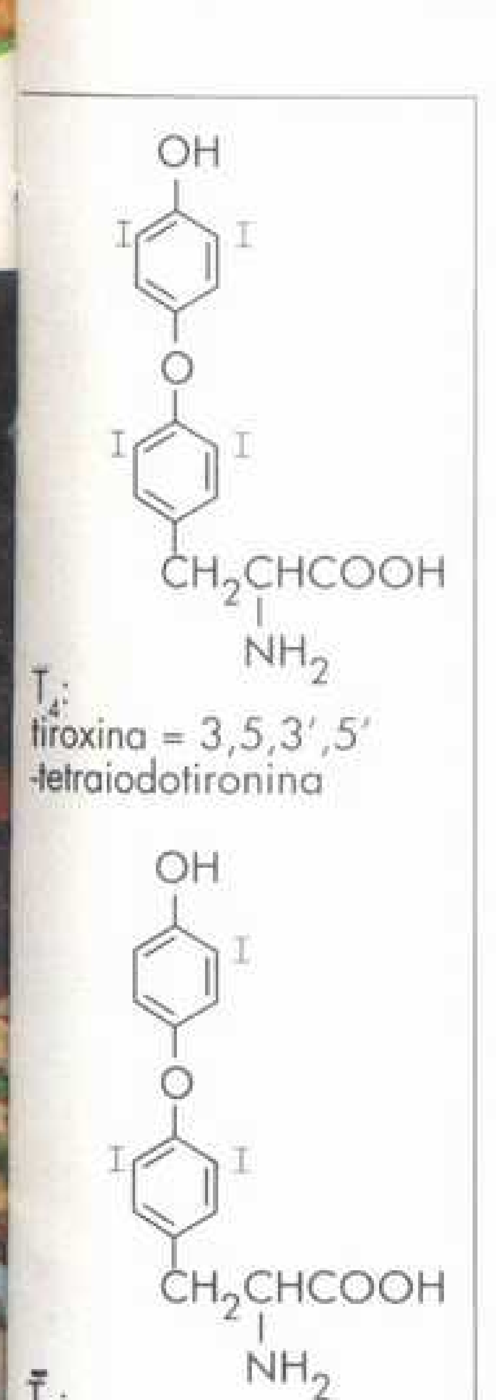
Así, las branquias son funcionales durante la vida larvaria, pero desaparecen en la metamorfosis (lo mismo que las arterias que las irrigan), según un proceso de muerte programada (apoptosis). El relevo lo toman los pulmones a partir de la fase juvenil, mientras que persiste la función respiratoria de la epidermis. Se individualiza un aparato circulatorio de vertebrado terrestre, que irriga la cabeza (carótida), el tronco y las extremidades (cayados de la aorta), los pulmones y la piel (tronco pulmocutáneo). En las larvas, como en los peces, los arcos esqueléticos estructuran una faringe voluminosa y separan las aberturas branquiales; durante la metamorfosis, el arco hioideo se incorpora al oído medio, formando la columela timpánica, un huesecillo que también aparece en los reptiles y las aves; los arcos branquiales construyen la laringe.

La adquisición de pulmones es uno de los grandes acontecimientos evolutivos. Presentes ya en los peces dipneos (como el protóptero), son más funcionales en los vertebrados superiores, en los cuales las vías respiratorias y digestivas se separan. Esta evolución, que tiene lugar a escala de la ramificación de los vertebrados, se reproduce en cierta manera y en muy poco tiempo en los anfibios metamórficos. El problema principal de la economía del agua se resuelve gracias a una serie de adaptaciones anatómicas y fisiológicas. De modo especial, el índice de proteínas plasmáticas (proteinemia) es más elevado en los adultos que en las larvas, lo cual favorece la retención de agua (por efecto «oncótico»). Por otra parte, la proteinemia aumenta más aprisa en la rana o la salamandra, esencialmente terrestres, que en la rana de uñas o el pleurodelo, que pueden seguir siendo acuáticos. La evolución del flujo urinario (diuresis), que desciende en los adultos, imita también la evolución constatada entre los peces de agua dulce y los vertebrados superiores. Los efectos de la vasotocina, principal hormona hipofisaria de los vertebrados inferiores, confirman este papel de bisagra. Frena la diuresis en la rana adulta, tal como lo hace la vasopresina (HAD) en los mamíferos. En cambio, la vasotocina tiene efectos diuréticos en la rana de uñas y los peces de agua dulce, evitando así la invasión de su medio por el agua.

La reproducción todavía sigue correspondiendo al medio acuático, a pesar de algunas tentativas que permiten soslayarla (viviparidad en el *Nectophrynoides*, incubación en una cavidad parental en la *Gastrotheca* y la *Rhinoderma*, o en una colchoneta de espuma en el *Chiromantis*, etc.). El paso decisivo lo darán los reptiles, con la aparición de una cavidad amniótica con contenido líquido que protege el desarrollo del embrión.

***Jacques Hourdry**, profesor de la universidad de Paris-Sud (Orsay).*

(1)
M.H.I. Dodd y J.M. Dodd, in B. Lofts (ed.), *Physiology of Amphibia*, Academic Press, Nueva York, 1976.
(2)
J.R. Tata, *Dev. Biol.*, *13*, 77, 1966.
(3)
J. Sap *et al.*, *Nature*, *324*, 635, 1986.
(4)
C. Weinberger *et al.*, *Nature*, *324*, 641, 1986.
(5)
Y.-B. Shi, *Trends Endocrinol. Metab.*, 5, 14, 1994.
(6)
B.G. Atkinson, *Dev. Genetics*, *15*, 313, 1994.
(7)
M.-J. Tsai y B.W. O'Malley, *Ann. Rev. Biochem.*, 63, 451, 1994.
(8)
J. Wong e Y.-B. Shi, *J. Biol. Chem.*, *270*, 18479, 1995.
(9)
Z. Wang y D.D. Brown, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 88, 11505, 1991.



LA SÍNTESIS DE LAS HORMONAS TIROIDEAS está regulada por el eje hipotálamo-hipofisiario gracias a un circuito complejo. Factores externos, como la temperatura y la luminosidad también influyen en la metamorfosis.[1]

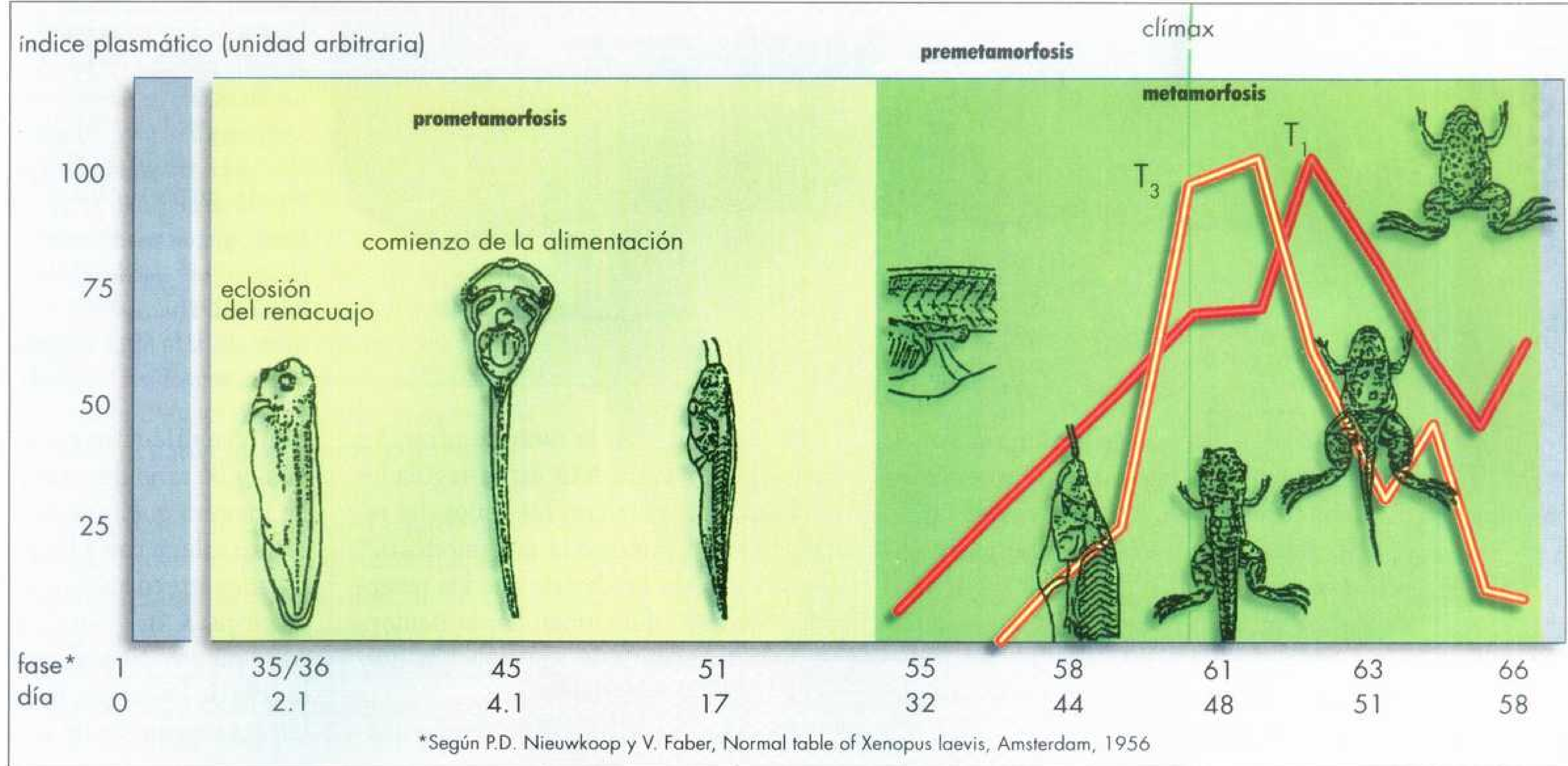


Figura 3. **La metamorfosis está provocada** *por dos hormonas segregadas por la glándula tiroides del renacuajo. La más activa es la hormona T_3. Su concentración en la sangre de los renacuajos guarda relación con los acontecimientos de la metamorfosis. Por ejemplo, aparecen las patas anteriores, y la cola empieza a retraerse a partir del paroxismo de la metamorfosis, que corresponde al pico de concentración de la hormona T_3 (los índices de hormonas son los que se citan en la ref. 18).*

hormonas se acumulan en el plasma. Cuando su concentración alcanza el pico, el renacuajo cesa de nutrirse y sufre las transformaciones más espectaculares.

Experimentos similares al de Friedrich Gudernatsch, efectuados en diferentes fases del desarrollo de los renacuajos, han demostrado que las larvas «saben» responder a la hormona justo después de su nacimiento (segundo día después de la fecundación) (fig. 4). Además, órganos aislados en tubos de ensayo pueden metamorfosearse si son tratados con la hormona, lo que indica que cada tejido es sensible al estímulo hormonal independientemente de los otros tejidos.

Finalmente, una última prueba del papel primordial de las hormonas tiroideas: la metamorfosis puede inhibirse bloqueando la síntesis de las hormonas tiroideas mediante inhibidores químicos o practicando una tiroidectomía. Mientras que el desarrollo normal de la rana de uñas, desde la fecundación hasta el final de la metamorfosis, tarda solamente dos meses, los renacuajos nacidos sin tiroides permanecen años en la fase de larva de dos semanas y media, aunque con un tamaño mayor (fig. 5). Sin embargo, estos gigantes pueden metamorfosearse cuando se añade al agua hormona tiroidea.

¿De qué modo una simple hormona puede tener efectos tan distintos, y también tan complejos, y hacer que éstos se sucedan en un orden determinado con tanta perfección? En 1966, Jamshed Tata, por entonces en el National Institute for Medical Research de Londres, descubrió que la metamorfosis requería una síntesis de proteínas, lo que implicaba genes y el núcleo celular.[2] Luego, a principios de los años 1970, varios equipos descubrieron en el núcleo de las células unos receptores de alta afinidad con la hormona. De ahí la idea de que las hormonas tiroideas regulan la expresión de genes activando sus receptores nucleares.

En 1986, los grupos de Björn Vennström, del Laboratorio Europeo de Biología Molecular (EMBL), de Heidelberg, y de Ronald Evans, del Salk Institute, de San Diego, aislaron de forma independiente el primero de estos receptores, el c-erb-A.[3,4] Posteriormente, se han descubierto otros receptores de las hormonas tiroideas (TR) en diversos animales, entre ellos dos anfibios, la rana de uñas y la rana toro (*Rana catesbeiana*).[5,6] Pertenecen a la familia de los receptores de las hormonas esteroideas, que incluye también los receptores de los glucocorticoides, de las hormonas sexuales (andrógenos, estrógenos), de los ácidos retinoicos (derivados de la vitamina A o retinol), etc.[7] En realidad, todos estos receptores son proteínas que hacen el papel de «factores de transcripción». Esto significa que, en presencia de la hormona, activan o reprimen la «lectura» (la transcripción) de genes particulares. Cada uno de ellos tiene un campo de fijación

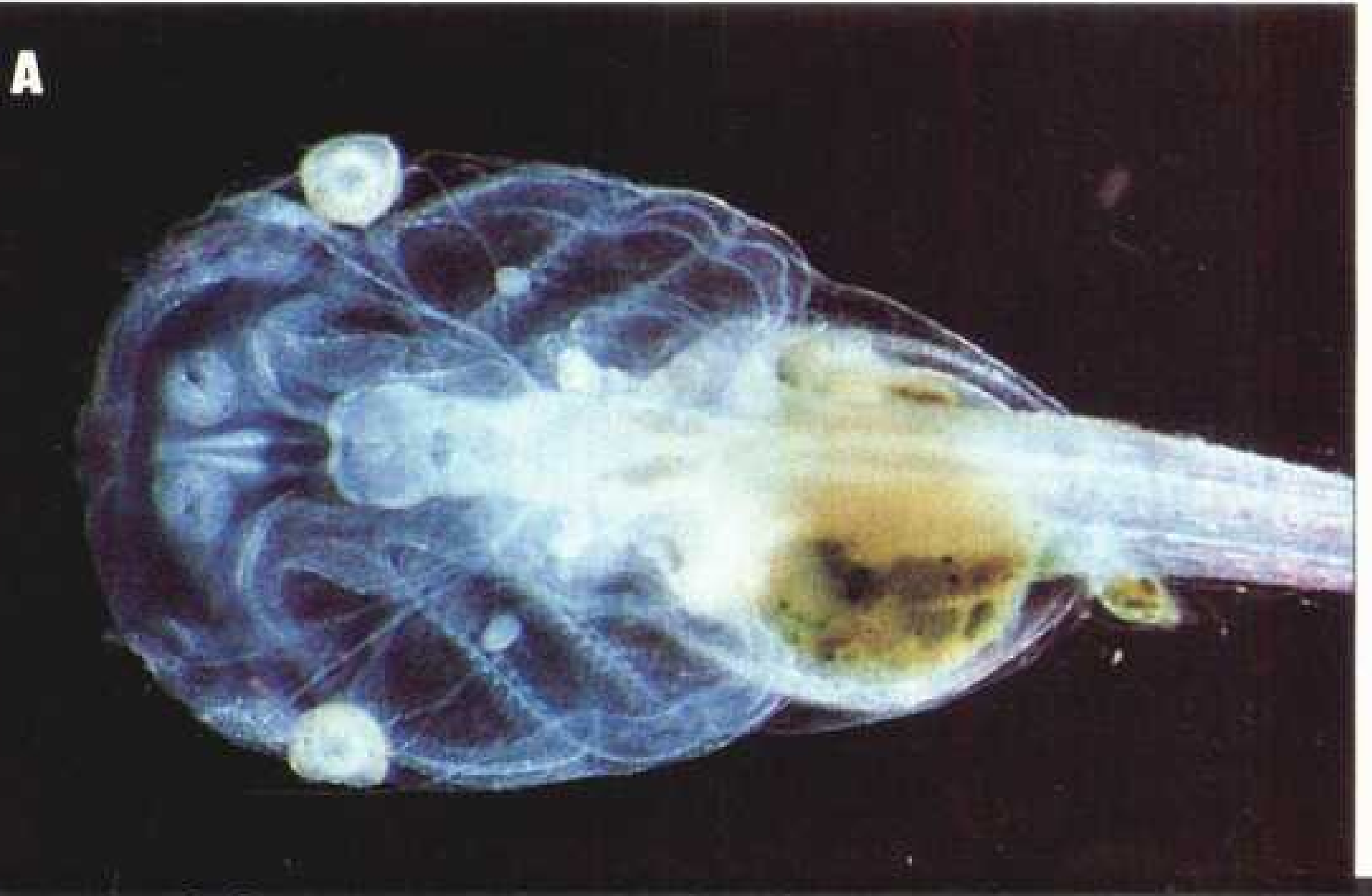


Figura 4. **En A, puede verse un renacuajo normal** *de rana de uñas en la fase 54 (inicio normal de la metamorfosis, trigésimo día después de la fecundación), y en B, un renacuajo de la misma edad, pero muy diferente, ya que ha recibido hormona tiroidea T_3 durante seis días.*

Muy pronto, la larva responde a la hormona



La hormona puede, pues, provocar sus efectos metamórficos incluso antes del periodo normal de la metamorfosis. (Fotos W.P. Hayes, Catholic University of America, Washington D.C.)

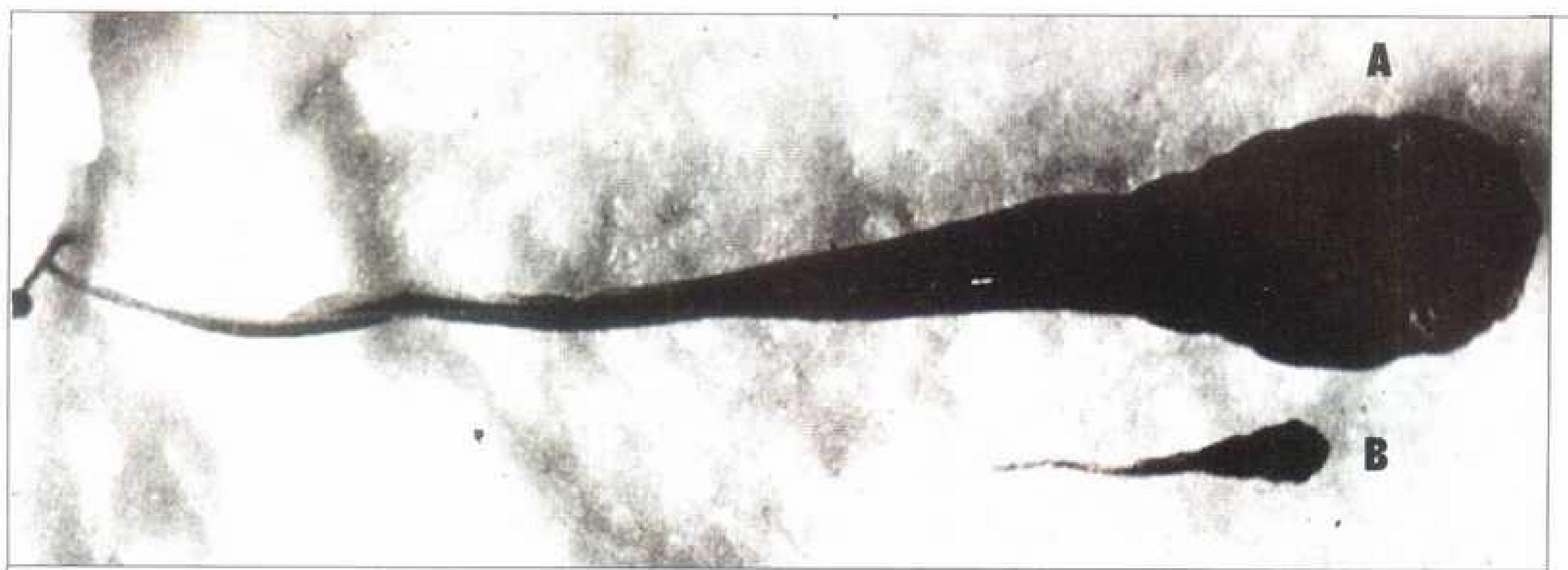


Figura 5. ***Los renacuajos de rana de uñas nacidos*** *sin tiroides (A) son incapaces de matamorfosearse. Son como larvas de 26 días (B), pero mucho más grandes y gordas (13 cm de longitud, 12 g). Estos gigantes pueden sufrir metamorfosis añadiendo hormona tiroidea al agua. (Tomado de la fig. 2 de la ref. (1), © Academic Press, Orlando, Estados Unidos.)*

del DNA y un campo de unión con la hormona. Las regiones que interaccionan con el DNA, muy parecidas en los diferentes receptores de las hormonas esteroideas, se unen a secuencias de DNA específicas, llamadas «elementos de respuesta a la hormona» (TRE).

Lo mismo que otros receptores de las hormonas esteroideas, los receptores de la hormona tiroidea T_3 se unen a los TRE en forma de dímeros que incluyen dos moléculas de TR (homodímeros) o una molécula de TR unida a otra molécula (heterodímeros). La pareja más frecuente del receptor de la hormona T_3 se encuentra entre los receptores de los ácidos retinoicos (los hay de dos tipos) y de la vitamina D. Se trata sobre todo de los receptores RXR (*retonoid-X receptors*), que fijan el ácido retinoico 9-cis (fig. 6). Los RXR están presentes en muchos tejidos, y su asociación con los receptores de la hormona T_3 parece conferir a la hormona la especificidad de su acción, incluso *in vivo*. El dímero formado por los dos receptores (TR + RXR) puede unirse a la secuencia TRE de los genes-diana, incluso en ausencia de la hormona tiroidea T_3 (fig. 7). Sin embargo, esta ausencia provoca el cese de la transcripción. Solamente cuando la adición de T_3 cambia la configuración del receptor, comienza a girar la «rueda» de la transcripción.

Los investigadores han empezado a identificar los genes de la cascada de regulación activada por la hormona tiroidea

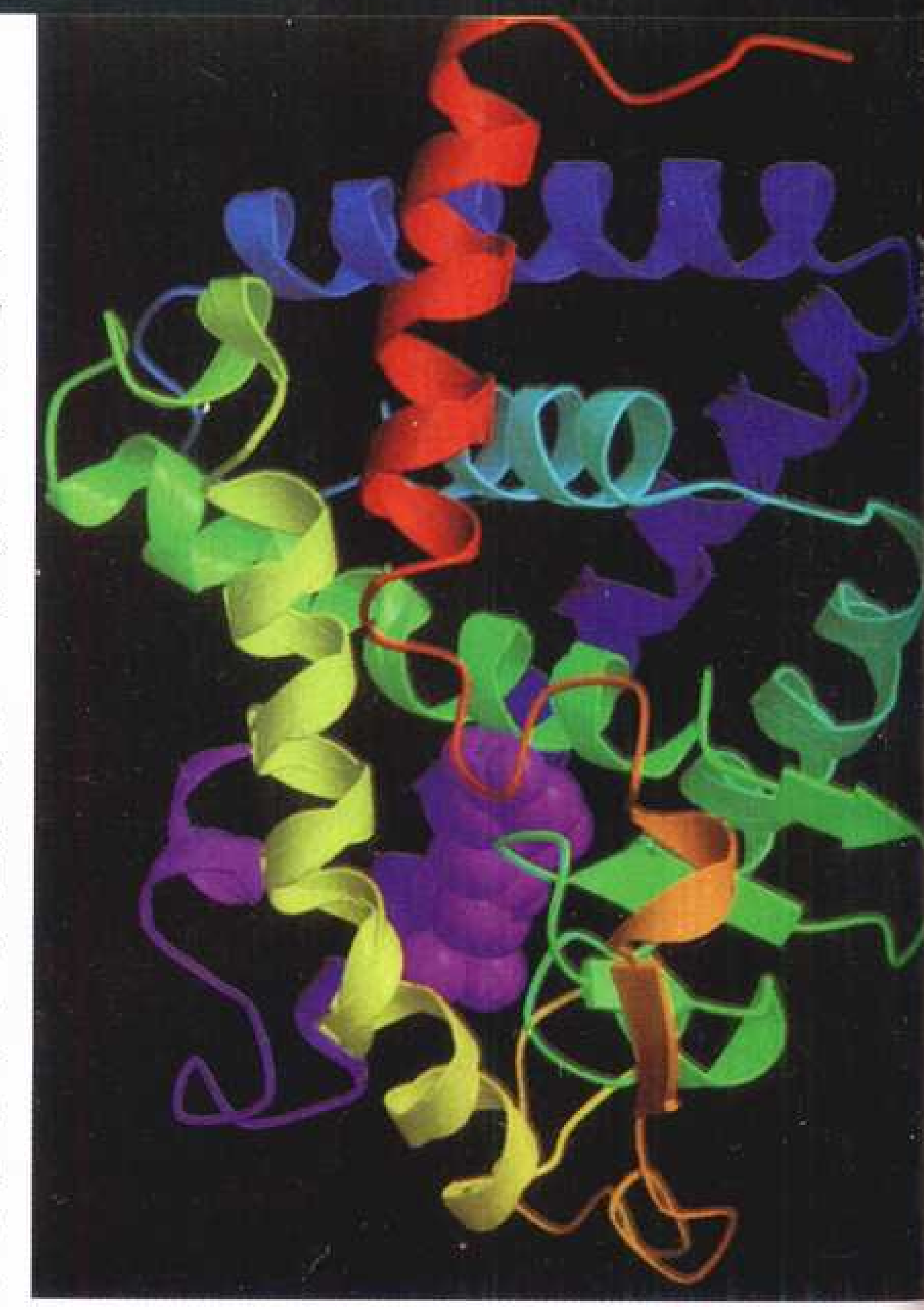
En los batracios coexisten dos subfamilias de receptores de la hormona tiroidea: TRα y TRβ. Lo mismo ocurre en las aves y los mamíferos. Pero en los anfibios, los genes que codifican estos receptores se expresan únicamente durante la metamorfosis, con un pico que se produce durante el apogeo del proceso (del cuadragésimo séptimo al quincuagésimo segundo día después de la fecundación). Esto sugiere que los TR son los intermediarios entre la hormona T_3 y la maquinaria celular que pone en funcionamiento. Por otra parte, nosotros hemos observado que, en la rana de uñas, los genes del receptor RXR están regulados en concomitancia con los genes del receptor de T_3 durante la metamorfosis.[8] Esto consolida la idea de que los receptores TR y RXR funcionan conjuntamente para transmitir la información hormonal a los genes-diana.

La descripción anterior permite pensar que la hormona tiroidea T_3 activa una cascada de regulación de genes en los tejidos que se remodelan en la metamorfosis. Los genes del peldaño superior son activados, o reprimidos, por los receptores nucleares de T_3, y sus productos actúan directamente en los tejidos, o bien intervienen en niveles inferiores de la escala regulando la actividad de otros genes.

Los investigadores han empezado a identificar los genes de esta cascada de regulación. En los anfibios, la ausencia de un método genético comparable al que se aplica en el caso de la drosófila o el ratón no ha simplificado el trabajo. Sin embargo, en 1991, Zhu Wang y Donald Brown, de la Carnegie Institution of Washington, de Baltimore, pusieron a punto un método bioquímico llamado «cribado diferencial sustractivo». Durante veinticuatro horas se tratan renacuajos de rana de uñas con hormona T_3, de manera que la acción de la hormona afecte solamente a los genes que son regulados precozmente durante la metamorfosis. Otros renacuajos se dejan sin tratamiento. Seguidamente, a partir de la cola de las larvas, tratadas o no, se aíslan los productos de la transcripción de

Figura 6. ***Los receptores celulares*** *de la hormona tiroidea T_3, llamados TR, modifican la expresión de ciertos genes. Para ello, se unen al DNA en forma de dímeros que asocian o bien dos moléculas de TR, o bien una molécula de TR y uno de los receptores RXR del ácido retinoico 9-cis. Aquí puede verse un modelo tridimensional (la estructura cristalográfica) del campo de unión con el ácido retinoico del receptor RXRα (a la izquierda) y un modelo del campo de unión con la hormona T_3 del receptor TR (abajo). Los investigadores no han construido todavía el modelo que asocia los dos receptores. (Fotos J.-P. Renaud, CNRS UPR 9004, Estrasburgo, R.L. Wagner et al., universidad de California, San Francisco.)*

Receptores activos durante la metamorfosis



(10) A. Kanamori y D.D. Brown, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 90, 6013, 1993.
(11) M. Ranjan *et al.*, *J. Biol. Chem.*, 269, 24699, 1994.
(12) J.J. Lee *et al.*, *Cell*, 71, 33, 1992.
(13) J.C. Smith, *Cell*, 76, 193, 1994.
(14) M.A. Stolow e Y.-B. Shi, *Nuc. Acids Res.*, 23, 2555, 1995.
(15) P. Basset *et al.*, *Nature*, 348, 699, 1990.
(16) D. Patterton *et al.*, *Dev. Biol.*, 167, 252, 1995.
(17) A. Ishizuya-Oka y A. Shimozawa, *Roux's Arch. Dev. Biol.*, 201, 322, 1992.
(18) J. Leloup y M. Buscaglia, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 284, 2261, 1977.

los genes, es decir, los RNA mensajeros (RNAm). Para obtener los RNAm correspondientes a los genes que no son regulados más que por la hormona, se sustraen los que se encuentran presentes en cantidades equivalentes en el grupo tratado y en el grupo no tratado (y que, por tanto, corresponden a los genes activados por otras proteínas que no son la T_3). Gracias a este método, Wang y Brown pudieron aislar quince genes activados y cuatro genes reprimidos por la hormona T_3.

Más tarde, estudiantes del equipo de Donald Brown aplicaron el método a las patas traseras de la rana de uñas, al intestino y a un cultivo celular.[9,10] Por una razón desconocida, en todos los tejidos observados hasta el momento, cinco genes, o quizá menos, son reprimidos precozmente por T_3 y más de catorce parecen ser activados en los diferentes tejidos.

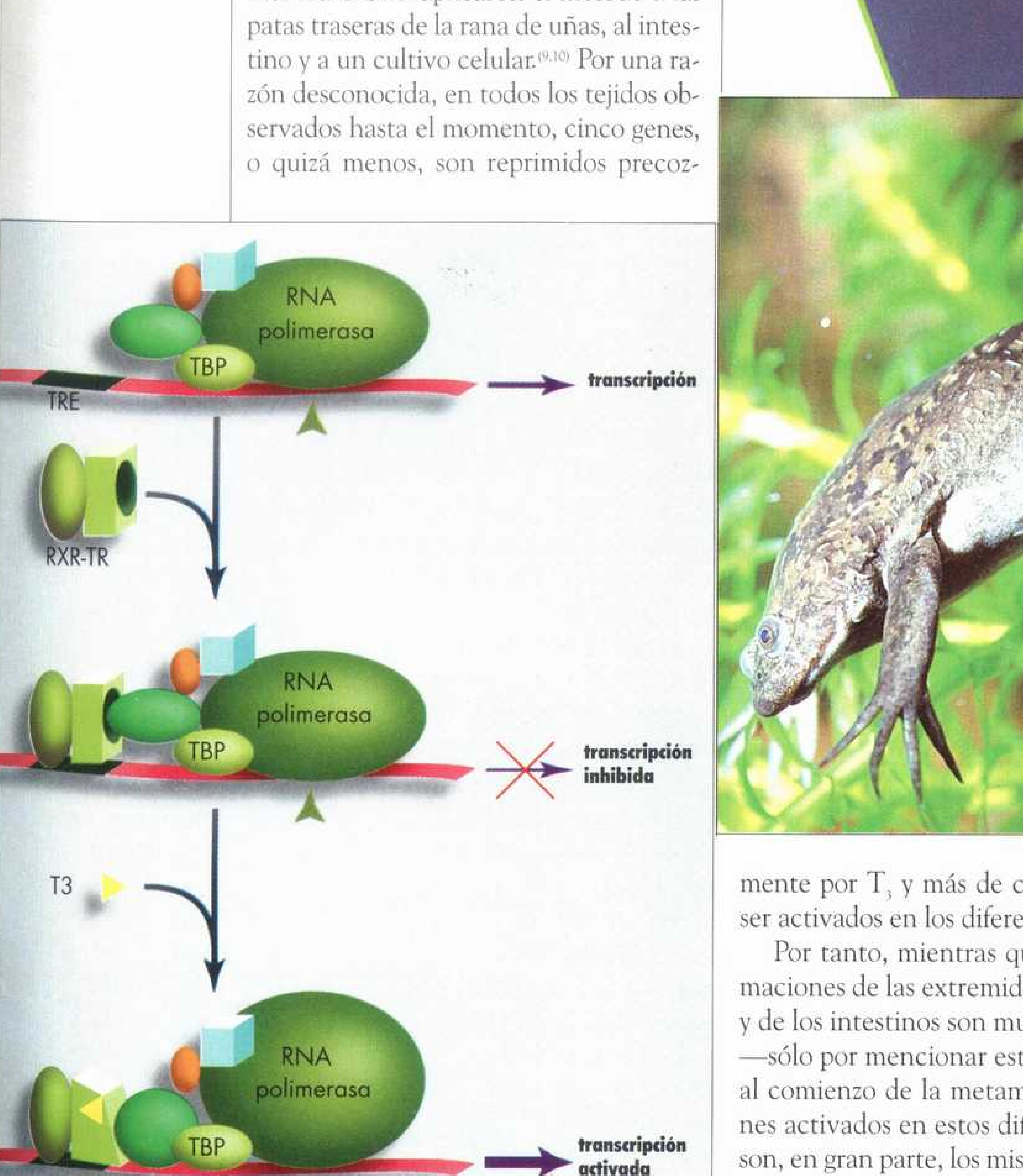


Figura 7. La molécula formada por los dos receptores (TR + RXR) de la hormona tiroidea T_3 se une a los genes-diana a nivel de una secuencia llamada TRE (elementos de respuesta a la hormona). En ausencia de la hormona T_3, la transcripción de los genes-diana se inhibe a causa de unas interacciones desconocidas entre los dos receptores, un factor todavía ignorado y la maquinaria enzimática (el RNA polimerasa y otras proteínas) que sirve para la transcripción. En cambio, cuando la adición de T_3 cambia la configuración de los receptores, del factor ignorado y, quizá también, del enzima, empieza la transcripción.

Renacuajo adulto de rana de uñas (Xenopus laevis). *(Fotos R. Konig y M. Dragesco/Jacana.)*

Por tanto, mientras que las transformaciones de las extremidades, de la cola y de los intestinos son muy contrastadas —sólo por mencionar estos ejemplos—, al comienzo de la metamorfosis, los genes activados en estos diferentes tejidos son, en gran parte, los mismos.[9] Esto significa que la especificidad de los cambios propios de cada órgano depende probablemente de la cooperación entre los productos de estos genes y los productos de genes específicos de los tejidos que, por su parte, no están sujetos a la influencia de la hormona T_3.

El análisis de la secuencia de los genes aislados en los órganos de la rana de uñas aporta nuevas informaciones. Muchos de ellos tienen estructuras parecidas —son homólogos— a los genes conocidos de otras especies. Algunos codifican factores de transcripción. Así, los genes que codifican los receptores TRa y TRb forman parte de los que son activados por T_3 en la rana de uñas.[11] Este bucle de regulación acentúa el efecto de la hormona, ya que ésta tiende a aumentar el número de receptores TR y, por tanto, su acción sobre los genes-diana.

En cambio, otros genes aislados hasta ahora no codifican factores de transcripción. Su función es, probablemente, indirecta. Uno de ellos es el homólogo del gen *hedgehog* clonado en 1992 en la drosófila.[12] Recientemente, se han descubierto otros homólogos en el ratón y el pollo.[13] Se trata de un «morfógeno», es decir, un gen que codifica una molécula participante en el desarrollo de una estructura del organismo. En la mosca, su misión es marcar las células que se convertirán en una u otra estructura (por ejemplo, la cabeza, el ala o la pata). En el ratón o el pollo, el homólogo del *hedgehog* interviene en la formación del sistema nervioso y las extremidades.

En 1995, nosotros demostramos que, en la rana de uñas, el homólogo del *hed-*

gehog es intensamente activo durante la remodelación del intestino cuando la metamorfosis está en su apogeo (hacia el quincuagésimo día después de la fecundación).[14] Los índices de expresión más elevados coinciden con la formación de los repliegues del epitelio adulto que sustituye las células epiteliales larvarias en proceso de degeneración. Así pues, el *hedgehog* parece actuar como un morfógeno durante la génesis del epitelio intestinal. Un segundo gen significativo codifica el homólogo de una proteína humana, la estromelisina 3, cuyo gen fue aislado en 1990 por el equipo de Pierre Chambon, del CNRS de Estrasburgo, a partir de tumores de mama.[15] La estromelisina 3 pertenece a una familia de proteínas de la matriz extracelular,* las metaloproteinasas. Estos enzimas pueden degradar compuestos diversos de la matriz, por lo que influyen en las interacciones entre células o entre células y matriz. Un hecho característico de la estromelisina 3: sólo se produce en las células normales que están muriendo por apoptosis, aunque se encuentra también en todos los cánceres epiteliales (carcinomas) humanos. En 1995, nosotros demostramos que la estromelisina 3 de la rana de uñas se produce en gran cantidad en el intestino del renacuajo cuando las células epiteliales entran en apoptosis, así como en la cola cuando empieza a ser reabsorbida.[16] Por otra parte, la morfogénesis del epitelio intestinal está relacionada con la migración y redisposición de las células epiteliales adultas, migración que se parece a la invasión de los tejidos por las células tumorales. El papel de la estromelisina 3 durante la metamorfosis de la rana de uñas parece, pues, ser muy semejante al papel que seguramente desempeña en la formación de las metástasis, que, en realidad, exigen una modificación importante de la matriz extracelular.

MATRIZ EXTRACELULAR
En todos los tejidos, las células están en contacto con una red organizada de grandes moléculas, polisacáridos (ácido hialurónico, etc.) y proteínas (colágenos, elastina, etc.). Hay que distinguir los tejidos conjuntivos, en los que la matriz, muy abundante, permite una función de cohesión; y los tejidos epiteliales, donde la matriz, aunque poco abundante, sirve de soporte físico a los epitelios que recubren el órgano, por ejemplo el intestino.

La activación de la estromelisina 3 y de la proteína *hedgehog* por la hormona T_3 durante la metamorfosis sugiere que la remodelación inducida por la hormona depende de las interacciones entre las células y entre las células y la matriz extracelular. Esto confirma observaciones anteriores efectuadas en el intestino de rana de uñas cultivado en medio sintético. Utilizando fragmentos de tejido procedente de diferentes porciones del intestino, A. Ishizuya-Oka y A. Shimozawa, de la escuela de medicina de la universidad de Dokkio (Japón), demostraron en 1992 que el desarrollo del epitelio adulto requiere la presencia del tejido conjuntivo larvario.[17] El tejido conjuntivo, al principio poco denso, se desarrolla mucho durante la metamorfosis a medida que va avanzando el proceso de redisposición del epitelio. Entre las células epiteliales y las células conjuntivas subyacentes se establecen numerosos contactos. Las interacciones entre estas diversas células están influidas, muy probablemente, por los productos de los genes activados precozmente por la hormona T_3, tales como la proteína *hedgehog* y la estromelisina 3. A su vez, estos genes modifican probablemente la expresión más tardía de otros genes. Su actividad, mensurable por el índice de producción de los RNA mensajeros, exige un tratamiento con hormona T_3 durante más de un día (en cambio, los genes de expresión precoz son activados en menos de veinticuatro horas). Hasta ahora, no se ha efectuado ningún análisis sistemático de los genes «tardíos», a pesar de lo cual muchos han sido identificados.[5]

¿Solución para eliminar un producto tóxico? Recurrir a la hormona tiroidea, que se encarga de activar los genes correctos

Así, durante la remodelación del sistema digestivo del renacuajo, cuando determinadas células mueren para ser reemplazadas por otras, los genes que codifican enzimas pancreáticos, como la tripsina, y los que especifican proteínas del epitelio intestinal, como la proteína de enlace con los ácidos grasos, son inhibidos.[5] Al final de la metamorfosis o después de una semana de tratamiento con la hormona T_3, estos genes son reactivados, mientras que las nuevas células se diferencian. Esto sugiere que lo que determina la suspensión de la inhibición de los genes de expresión tardía, en condiciones naturales, es la disminución de la tasa de hormona al final de la metamorfosis. Un ejemplo típico de las redisposiciones de la metamorfosis es la modificación del sistema de excreción de los residuos nitrogenados. En el renacuajo, igual que en los peces, el producto excretado es el amoniaco. Pero en ausencia de agua, este producto es tóxico y los vertebrados terrestres han debido inventar un medio para eliminarlo. En estos animales, unos nuevos enzimas del hígado, identificados por H. Krebs (Oxford, 1932), convierten el amoniaco en urea (o en ácido úrico en los pájaros y ciertos reptiles), una sustancia poco tóxica (véase el recuadro «¿Una bisagra en los vertebrados?»).

En realidad, varios investigadores norteamericanos (John Dolphin, Earl Frieden, Philip P. Cohen) demostraron, en los años 1950, que la actividad de estos enzimas hepáticos en el hígado se decuplica durante la metamorfosis, tanto si es natural como provocada. S.M. Morris, de Pittsbugh, Jamshed Tata, de Londres, y B.G. Atkinson, de Canadá, lo confirmaron al demostrar que la transcripción de los genes que codifican estos enzimas se activa si los renacuajos premetamórficos son tratados con hormona T_3 durante más de un día.

En resumen: hoy resulta evidente que la hormona tiroidea T_3 induce la transformación de cada tejido larvario provocando una cascada de regulaciones de varios genes. La hormona se fija en sus receptores, que forman un complejo capaz de provocar la lectura de genes precoces. Entre estos genes existen otros factores de transcripción que regulan de forma directa la expresión más tardía de genes situados en niveles inferiores de la cascada. En cambio, los factores activados por T_3, pero que no inducen la transcripción de genes, actúan modificando la superficie celular o la matriz extracelular, lo que influye en las interacciones celulares. La estromelisina 3 es un ejemplo de ello. Otras proteínas, como la *hedgehog*, parecen intervenir en la información de posición de unas células respecto a otras. Por consiguiente, lo que provoca la degeneración de los tejidos larvarios y la formación de los tejidos adultos es la combinación entre unas acciones que modifican la transcripción de genes codificadores de proteínas de estructura y enzimas, y otras acciones sobre las interacciones celulares.

Actualmente, los investigadores intentan descifrar la función de cada uno de los genes de la cascada. El estudio *in vitro* de la remodelación de los tejidos deberá aportar una gran información sobre la construcción de los órganos.

Y.-B.S., M.S., M.P.-K y J.W. ■

Para más información

■ J.-J. Blunhiol, *Larves et métamorphoses*, PUF, París, 1980.

■ A. Beaumont *et al.*, *Développement*, Dunod, París, 1994.

■ J. Hourdry *et al.*, *Métamorphoses animales. Transitions écologiques*, Hermann, París, 1995.

■ D. Doumenc y P.-M. Lenicque, *La Morphogenèse, développement et diversité des formes vivantes*, Masson, París, 1995.

■ M.H.I. Dodd y J.M. Dodd, *in* B. Lofts (ed.), *Physiology of Amphibia*, Academic Press, Nueva York, 1976.

■ L.I. Gilbert y E. Frieden, *Metamorphosis, a problem in development biology*, Plenum Press, Nueva York, 2ª ed., 1981.

■ W.E. Duellman y L. Trueb, *Biology of Amphibians*, McGraw-Hill, Nueva York, 1986.

■ J.R. Tata, *Bioessays*, *15*, 239, 1993.

■ M.-J. Tsai y B.W. O'Malley, *Ann. Rev. Biochem.*, 63, 451, 1994.

■ V.A. Galton, *in* J.H. Oppenheimer y H.H. Samuels (eds.), *Molecular basis of thyroid hormone action*, Academic Press, Nueva York, 1983.

■ Para una bibliografía más completa, véase la página 593

EL NACIMIENTO DEL ARIANE 5

La aventura espacial europea podría topar con un obstáculo económico



(foto ESA)

El lanzamiento del cohete europeo Ariane 5 suscita reflexiones. A la vez que aporta un aumento de la potencia que le empezaba a faltar a Ariane 4 para responder a las necesidades cambiantes del mercado de lanzamiento de satélites, el nuevo lanzador se ha construido partiendo de opciones tecnológicas que privilegian la fiabilidad. Pero la supremacía europea en este mercado pasa por dificultades y no es seguro que Ariane 5 la pueda mantener sin disminuir sus precios y por lo tanto su rentabilidad. Además, el lanzador da lugar a la crítica medioambiental, olvidada durante demasiado tiempo por la industria espacial.

PRUDENCIA TECNOLÓGICA

Alain Chappe

Ariane 5 podrá lanzar dos satélites simultáneamente

ALAIN CHAPPE es delegado de los programas de transporte espacial y de infrastructura orbital de la Dirección de Programas y Política Industrial del Centro Nacional de Estudios Espaciales, en Francia.

El desarrollo del nuevo lanzador europeo se ha inspirado en el objetivo de superar las prestaciones de Ariane 4 con objeto de satisfacer las nuevas demandas del mercado. Fundamentalmente, las opciones tecnológicas han sido prudentes con objeto de limitar los riesgos de accidente y la deriva de costes.

Desde hace ya quince años Europa dispone, con el lanzador Ariane, de una autonomía de acceso al espacio. El mantenimiento de esta autonomía, en condiciones de credibilidad técnica suficiente y a un precio aceptable para los gobiernos europeos, impone que el lanzador sea utilizado frecuente y regularmente, lo que no permite el modesto nivel de las necesidades propiamente europeas. Por lo tanto, es esencial para Ariane captar una parte importante del mercado mundial de los alrededor de 15 a 20 satélites que se lanzan cada año. Este imperativo de competitividad explica las decisiones europeas de hacer evolucionar Ariane 1, cuyo primer lanzamiento tuvo lugar en diciembre de 1979, hasta su versión actual, Ariane 4, en servicio desde 1988. También preside la concepción del nuevo lanzador Ariane 5 y justifica el compromiso actual del programa de desarrollo *Evolution Ariane 5*, destinado a aumentar el rendimiento de Ariane 5 a partir del 2002.

El diseño de Ariane 5 obedece a tres objetivos: poner en órbita de transferencia geoestacionaria(*) (GTO) dos satélites de una masa total de 5,9 toneladas, alcanzar una fiabilidad del 98,5 % y un coste total por lanzamiento un 10 % inferior al del actual lanzador Ariane 44L (la más potente de las seis versiones de Ariane 4) actualmente en servicio.

El objetivo de rendimiento elegido para Ariane 5 significa que el lanzador está optimizado para satisfacer a la demanda dominante en el mercado —la inyección en órbita GTO de satélites comerciales de telecomunicaciones— utilizando la técnica del *«lanzamiento doble»* (dos satélites emparejados a bordo del mismo lanzador). Este objetivo tiene en cuenta el aumento progresivo, correctamente previsto en el momento de la toma de decisiones en 1987, de la masa de los satélites de telecomunicaciones que constituyen el sector dominante del mercado. Este incremento de masa es el resultado del aumento de la capacidad disponible a bordo, de la potencia de emisión y de la duración del funcionamiento de los satélites. Actualmente hace que la masa media de los satélites del mercado se sitúe alrededor de las 3 toneladas.

Ariane 5, con una capacidad de 5,9 toneladas, permitirá así que Arianespace recupere la capacidad sistemática de lanzamiento doble que está perdiendo progresivamente con Ariane 4 (4,4 toneladas como máximo con el Ariane 44L), y le conferirá, conjuntamente con la reducción de los costes de lanzamiento, una nueva competitividad.

El desarrollo de Ariane 5 se ha guiado por una preocupación constante de fiabilidad. El objetivo: 985 éxitos por cada 1.000 lanzamientos

Ariane 5 está constituido por un bifase inferior y un compuesto superior. El bietapa inferior es idéntico para todas

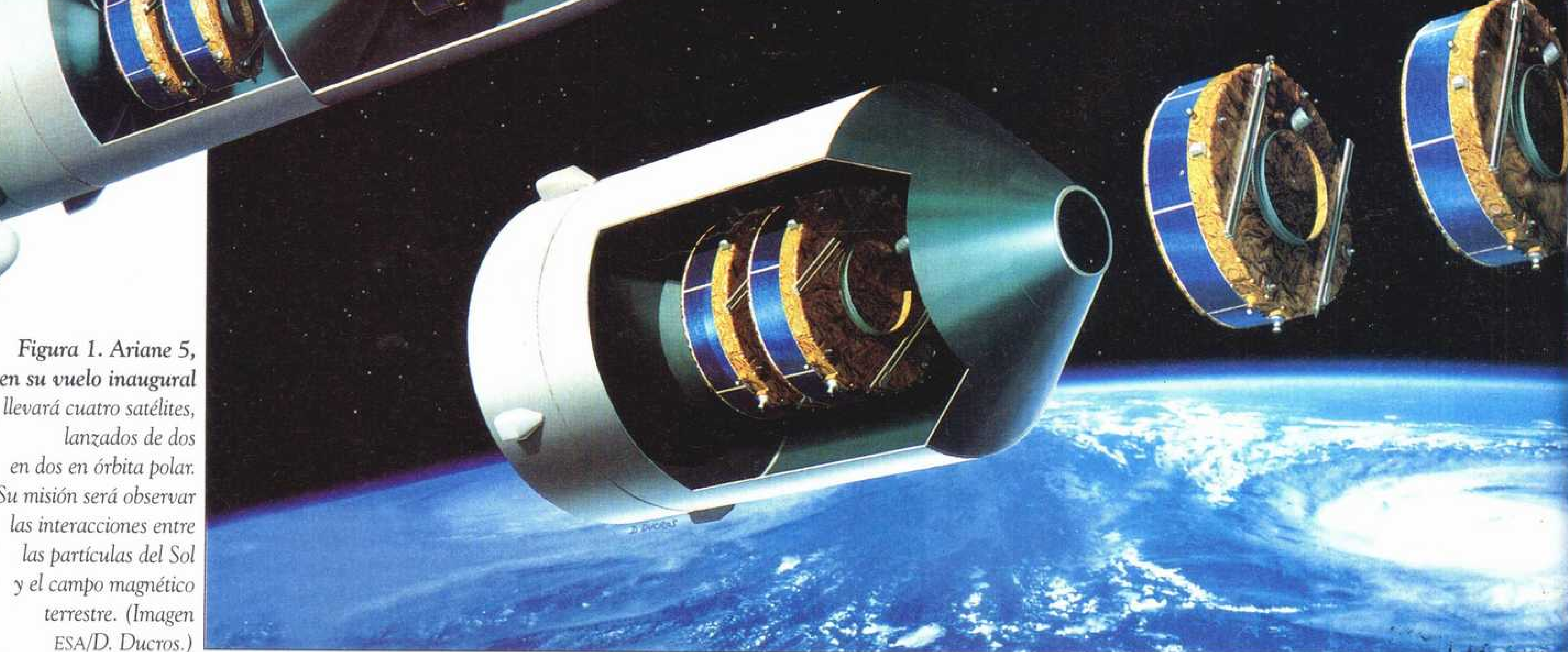


Figura 1. Ariane 5, en su vuelo inaugural llevará cuatro satélites, lanzados de dos en dos en órbita polar. Su misión será observar las interacciones entre las partículas del Sol y el campo magnético terrestre. (Imagen ESA/D. Ducros.)

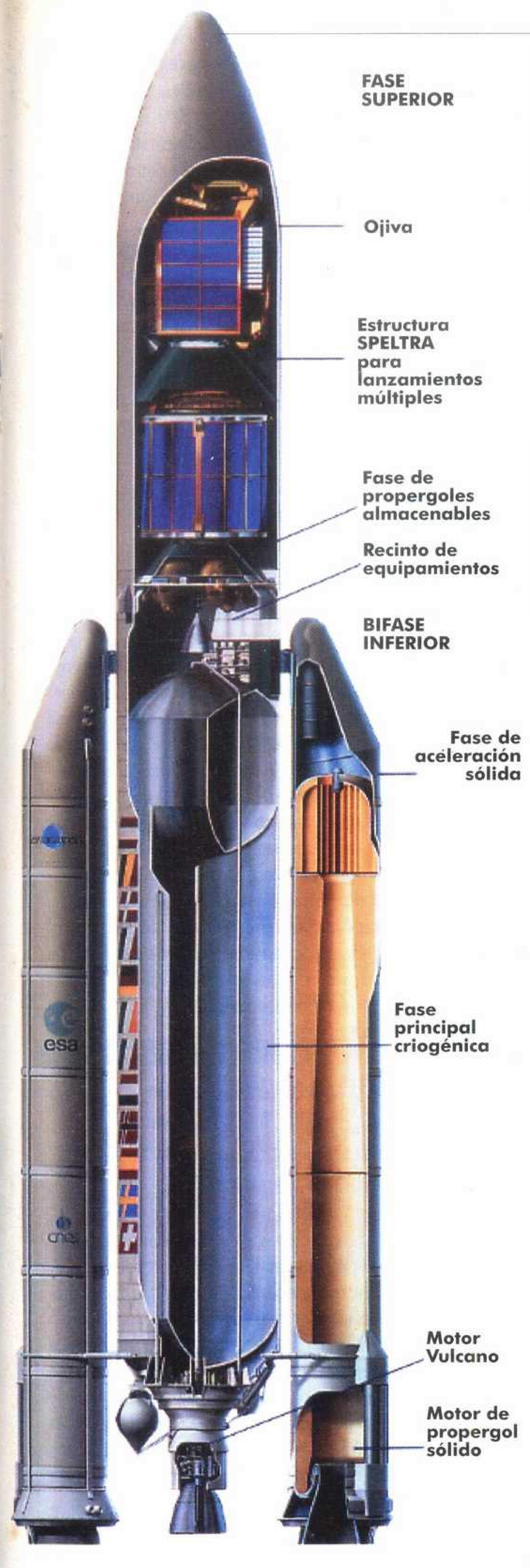


Figura 2. El lanzador se compone de dos elementos: un «bifase» inferior que será el mismo en todas las misiones, y una fase superior de acondicionamiento variable según la misión. El conjunto mide 51 m y tiene una capacidad de transporte en órbita de transferencia geoestacionaria de 5,9 t para un lanzamiento doble y de 6,8 t para un lanzamiento simple, y de cerca de 20 t en órbita baja. (Ilustración Arianespace.)

las misiones y proporciona lo fundamental de la velocidad y la altura necesarias para la satelización. Comprende una Fase Principal Criogénica (FPC) que contiene 157 toneladas de combustible líquido (26 toneladas de hidrógeno y 131 toneladas de oxígeno), y está equipado con un motor Vulcano de 1,14 MN (meganewton) de empuje en el vacío (885 kN en tierra). Contiene además una Fase de Aceleración Sólida (FAS) constituida por dos propulsores de propergol sólido P230 de 5,4 MN de empuje en el despegue. Estos propulsores proporcionan la mayor parte del empuje durante 130 segundos para vencer el peso en la fase inicial, mientras que la FPC, de un empuje diez veces inferior pero ejercido durante 600 segundos, contribuye fundamentalmente al aumento de velocidad.

El compuesto superior comprende una Fase de Propergoles Almacenables —monometilhidracina y tetróxido de nitrógeno— llamada FPA y dotada de un motor Aestus de 20 kN. A su alrededor se encuentra un recinto de equipos que contiene la electrónica del lanzador. Finalmente, una ojiva contiene uno o varios satélites con sus adaptadores y las estructuras SPELTRA y/o SILMA para los lanzamientos múltiples. Si el motor Aestus corresponde a técnicas ya bien controladas por la industria europea, los desarrollos del motor Vulcano y de los grandes aceleradores sólidos han representado un esfuerzo nuevo y de gran amplitud.

Teniendo el cuenta los condicionamientos presupuestarios y de calendario, y con objeto de limitar los riesgos, el Centro Nacional de Estudios Espaciales, en Francia, ha elegido para el motor criotécnico Vulcano un ciclo de flujo derivado: en éste, las turbinas de las turbobombas que alimentan la cámara de combustión son movidas por gases producidos en un generador de gas; a continuación estos gases se eyectan al exterior del motor, por lo que contribuyen muy poco a la propulsión. En cambio, en el ciclo de flujo integrado, los gases que proporcionan la aceleración de las turbobombas salen de las precámaras a muy alta presión y se reintroducen a continuación en la cámara principal, lo que permite aumentar netamente el impulso específico del motor. Pero esta opción técnica, adoptada por ejemplo por el lanzador japonés H2, le habría supuesto a Europa unos riesgos de retrasos y unos costes de desarrollo suplementarios. El desarrollo del motor Vulcano ha exigido un programa de 270 pruebas con 17 motores, totalizando 72.000 segundos de funcionamiento, que han permitido explorarlo hasta sus límites extremos.

En cuanto a los propulsores P230, corresponden al concepto tradicional de la propulsión por ergoles sólidos. El oxidante y el reductor están íntimamente mezclados en una pasta inerte: una vez obtenía la colada de ésta, se polimeriza en la cubierta del motor en presencia de un molde central que le da al bloque de propergol la forma interior deseada para el desarrollo de la combustión. Sin embargo, el desarrollo del P230 —que contiene

LAS OBLIGACIONES EN EL PROGRAMA ESPACIAL EUROPEO

Los programas europeos de lanzadores se desarrollan siguiendo un esquema ya probado según el cual el Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES), en Francia, define los conceptos y recibe de la Agencia Espacial Europea (ESA) la delegación de la gestión técnica y financiera de los desarrollos. La explotación está confiada a Arianespace, que comercializa los lanzadores, organiza la producción industrial, termina la integración en Guyana y realiza los lanzamientos con el apoyo operativo del CNES. El conjunto del programa espacial europeo se basa en el Centro Espacial de Guyana (CEG), bajo responsabilidad francesa, donde coexisten medios de producción industrial, medios de pruebas y dispositivos de lanzamientos y un centro técnico del CNES. En el desarrollo de Ariane 5 intervienen siete industrias europeas importantes: Aérospatiale, arquitecto industrial y productora de la FPC y la FAS; la Sociedad Europea de Propulsión (SEP), para el motor Vulcano; Europropulsion (filial de SEP y de Fiat/BPD), para los motores de propergol sólido; Erno, fabricante de la FPS; Matra Marconi Space, responsable del recinto de equipamientos; Dornier, responsable de la estructura de lanzamiento doble SPELTRA; y Oerliken-Contraves, responsable de la ojiva.

El coste total del programa de desarrollo es del orden de 7.300 millones de dólares. La distribución geográfica de los trabajos se ajusta a las contribuciones de los estados participantes, con el acuerdo de que al final del desarrollo el «retorno industrial» (relación entre los contratos encargados a un país y la contribución de este país) tiene que ser al menos de 0,9 para cada uno de los estados participantes. Los tres principales contribuyentes son Francia (46 %), Alemania (22 %) e Italia (15 %). Bélgica y España vienen a continuación con el 6 % y el 3 %, y luego Holanda, Suecia y Suiza a un nivel del 2 % cada uno. Gran Bretaña está ausente del programa. Esta inversión en fase de desarrollo produce luego, y esto es único en los programas de la ESA, un plan de encargos industriales duradero en fase de explotación de unos 700 millones de dólares anuales (hará 5 lanzamientos al año), distribuido entre los países en proporciones muy similares a las del desarrollo.

237 toneladas de propergol en una columna de 31 metros de altura— ha representado un cambio radical de escala respecto a las mayores realizaciones europeas.(*)Debido a su tamaño y a su masa, este propulsor con cubierta de acero está dividido en tres segmentos. Los dos más importantes se cargan directamente con propergol sólido en la Factoría de propergol de Guyana, implantada en la base espacial de Kourou, donde se efectúan a continuación la integración de los propulsores y las pruebas. El segmento delantero, más ligero, se carga en la fábrica de propergoles de Colleferro, en Italia. Los procedimientos de colada se dominan totalmente y está garantizada la reproducibilidad de la producción. La totalidad del programa de pruebas se ha realizado en Guyana con éxito.

El diseño de Ariane 5 está guiado por una preocupación constante de fiabilidad. El número de motores se ha limitado a cuatro, las opciones tecnológicas están inspiradas por la prudencia: flujo derivado para el Vulcano, alimentación del motor Aestus por helio presurizado (y por tanto sin turbobombas), envolturas de los propulsores sólidos de acero, procedimiento de encendido y de control previo del funcionamiento del Vulcano antes del encendido irreversible de los P230 (con objeto de evitar el riesgo de perder la misión si el Vulcano no se encendiese después del despegue), redundancia de todas las funciones críticas, y finalmente una concepción del sistema que conduce a un lanzador más tolerante que Ariane 4 respecto a fallos de los equipos.

La capacidad de 5,9 toneladas en órbita de transferencia geoestacionaria determinada en 1987 para Ariane 5 se adecua a las previsiones actuales del mercado en el horizonte del año 2000. En efecto, permite asociar, por ejemplo, en el marco de un lanzamiento doble, un satélite de tres toneladas (clase del lanzador norteamericano Atlas-2AS) y un satélite de 2,5 toneladas (clase Altas-2A), que son, los, importantes componentes del mercado actual. La evolución hacia un mercado dominado por satélites de 3 a 3,5 toneladas más allá del 2002 hará sin embargo más difícil la realización sistemática de lanzamientos dobles con la capacidad actual de Ariane 5.

Por esta razón, el CNES ha preparado un nuevo programa, denominado *Evolution Ariane 5* y aprobado por el Consejo de Ministros de Agencia Espacial Europea (ESA) en octubre de 1995, que tiene un coste de unos 1.200 millones de dólares. Este programa se basa en un conjunto de desarrollos complementarios que permitirán aumentar la capacidad del lanzador manteniendo su sencillez de diseño y su fiabilidad y contribuyendo a reducir los costes.

El desarrollo del Vulcano Marque 2 (nueva turbobomba Oxígeno, modificación de la cámara de combustión, desarrollo de un diversor avanzado), asociado a una fase H 170, que elevará el empuje del Vulcano de 1 .140 a 1.350 kN, constituye el elemento esencial del programa *Evolution*. Hace coincidir el imperativo de evolución de la capacidad con la necesidad de garantizar, en el campo de la propulsión criotécnica, la continuidad de las capacidades industriales que son indispensables tanto para el mantenimiento del lanzador en fase de explotación como para la preparación del futuro. El programa así iniciado tendría que llevar a un primer vuelo del lanzador Ariane 5 «evolucionado» en el 2003.



Figura 3. El motor criogénico Vulcano *durante una prueba en la SEP de Vernon. Propulsará la fase principal de Ariane 5. Se basa en el concepto de ciclo de flujo derivado, en el que las turbobombas que alimentan la cámara son movidas por la combustión, en un generador de gas, de ergoles obtenidos (3 %) del circuito principal. (Foto SEP.)*

LA ÓRBITA DE TRANSFERENCIA GEOESTACIONARIA (GTO) es una órbita de 200 km de altura en el perigeo y 36.000 km en el apogeo, en la que los lanzadores sitúan primero a los satélites geoestacionarios. Estos terminan ellos mismos su colocación dando, en el apogeo, un impulso que los sitúa en una órbita circular ecuatorial, llamada geoestacionaria, a 36.000 km.

LOS MOTORES de los misiles estratégicos franceses M4 sólo contienen unas 35 toneladas de propergol en once metros de altura.

Para adaptarse a los satélites más pesados, hay que prever el lanzamiento de un Ariane 5 «evolucionado» en el 2003

Una vez asegurada la autonomía europea de acceso al espacio durante los próximos quince años —en el supuesto de que se mantenga la posición de Ariane 5 en el mercado frente a una competencia en plena evolución—, es probable que Europa inicie una pausa en materia de grandes equipamientos. Sin embargo es indispensable mantener una competencia técnica de muy alto nivel y adquirida a costa de grandes esfuerzos.

Sólo una política de investigación tecnológica reforzada y nuevos programas en Europa, que pongan de manifiesto la capacidad tecnológica, fundamentalmente en el campo de la propulsión (demostrador de motor de flujo integrado), proporcionarán a la industria los medios de mantener la explotación de Ariane 5, de mantener su adecuación al mercado y de iniciar, cuando llegue el momento, un nuevo desarrollo. **A.C.** ■

PARTICIPACIÓN ESPAÑOLA EN ARIANE 5

Ignacio Bravo

Alcanza el tres por ciento

IGNACIO BRAVO,
periodista científico.

La participación de las empresas españolas en ARIANE 5, según los datos facilitados por el CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), alcanza el 3 % del presupuesto total lo que representa un montante, en pesetas corrientes acumulado en once años de duración del programa, de aproximadamente 24.000 millones de pesetas.

La contribución de la industria española al proyecto espacial europeo ARIANE se resume en los siguientes datos:

CASA ESPACIO

La participación de CASA, a través de la División Espacio, versiones de ARIANE 2 y 3 y se consolida en ARIANE 4 para el que se suministran componentes de la estructura principal, sistemas eléctricos y unidades electrónicas de altas prestaciones.

Con esta experiencia, se asigna a CASA el desarrollo y calificación dentro del proyecto ARIANE 5 de:

- *Estructura de la caja de equipos*, que acomoda el equipamiento para el guiado, control y servicio de la etapa superior del lanzador.
- *Estructura* EPS, cuya misión es acomodar el motor, tanques de combustible y equipo necesario para la motorización de la etapa superior.
- *Adaptadores de satélites*, que como en ARIANE 4 constituyen el nexo de unión estructural y funcional con el lanzador y son responsables de su separación.

La función de la Caja de Equipos de ARIANE 5 es garantizar una correcta separación entre las dos etapas, que se consigue mediante el corte de un anillo metálico de 5,4 m de diámetro y 4,5 mm de espesor.

La separación exige una adecuada amortiguación en la propagación de la onda de choque producida, con el objeto de evitar daños en equipos vitales para la misión del lanzador, como es el caso de la Central Inercial, situada a menos de 0,5 m de plano de separación.

Aparecen como nuevas funciones de los Adaptadores de Satélites desarrollados para ARIANE 5 la atenuación de los flujos de carga y la amortiguación en la transmisión del choque generado en las separaciones que, en otro caso, llegarían al satélite con grave riesgo para los equipos embarcados.

Los componentes desarrollados de la etapa superior, y específicamente la separación de etapas, tienen incidencia directa en la fiabilidad del lanzador. Ésta es la razón de la calificación emprendida por la División Espacio, que abarca desde la puesta a punto de modelos analíticos específicamente desarrollados para su estudio, hasta la ejecución de ensayos funcionales (de separación y transmisión del choque y ensayos de calificación por carga estática que involucran modelos completamente equipados y con calidad de vuelo de la Caja de Equipos, EPS, Adaptadores y sus estructuras contiguas correspondientes a la 1ª y 2ª etapa del lanzador.

SENER

Sener, cuyas principales actividades espaciales son: Mecanismos y estructuras, electrónica de control, software, fluido termodinámico, es la responsable de la reconstrucción de los datos de vuelo del ARIANE 4, del estudio de la modelización del tercer escalón tras su operación (PRESCAR) y del aprovechamiento de los ergoles residuales, tarea hechas para Arianespace y Aerospatiale, como arquitecto industrial, respectivamente.

Para ARIANE 5 la tarea comenzará cuando éste efectivamente vuele, estando apalabrada la gestión de los pri-



Figura 1. El sistema de control y mando de las instalaciones *de preparación y lanzamiento del cohete Ariane 5 es, entre otras, una de las actividades de la empresa* GTD. *En la foto superior, un aspecto del Centro de lanzamiento del* ARIANE 5. *Abajo, la Crisa electrónica secuencial del* ARIANE 5 *(Fotos* GTD.*)*

meros cincuenta vuelos, esto es los próximos ocho años.

La empresa ha realizado el estudio y la ingeniería de recuperación de los EAP (motores sólidos) del ARIANE 5 en la mar, como subcontratista de Aeroespatiale, y la ingeniería de separación y seguimiento de la caída de los EAP, como subcontratista de FOKKER. Aparte del trabajo en ARIANE, es el contratista principal, en asociación con DASA (Alemania) del programa FESTIP para el desarrollo del futuro sistema europeo de acceso al espacio, esto es la generación siguiente al ARIANE 5, utilizando vehículos con propulsión híbrida de reactor y cohete.

SENER es la empresa iniciadora, y el mayor accionista español (25,5 %), de Industrias de Turbo Propulsión (ITP), la única empresa española que fabrica motores a reacción y es accionista de Arianespace, con un 0,57 %.

Datos de la inversión: Capital más reservas (2.100 M/ptas.), Facturación (12.500 M/ptas./año), Facturación espacial (2.500 M/ptas./año).

CIMSA

CIMSA inició sus trabajos en el Programa de recuperación de los cohetes auxiliares del ARIANE 5 en el año 1990, dentro de un consorcio formado por la empresa alemana Autoflug, la inglesa Irvin y la propia CIMSA. El contratista en Fokker Space & Systems, que a su vez lo era de Aerospatiale y éste de CNES. Concluidas las fases de *Trade-off* y de diseño preliminar, se produce un cambio de estrategia por parte del CNES que quiere incluir al SRIPC (Instituto ruso dedicado al diseño y construcción de sistemas de recuperación de cargas espaciales, entre otras actividades) en el programa. Un cambio en la propiedad de Autoflug aleja a esta empresa de su interés por el programa, mientras CIMSA, gracias al apoyo decidido del CDTI y a su experiencia en la primera fase, consigue entrar en un nuevo comercio con Rusia, responsabilizándose de la gerencia de la UTE (Unión Temporal de Empresas), que forma al efecto, y de otros aspectos de la gestión técnica. El sistema está ya calificado y se han entregado los elementos correspondientes al primer vuelo, no sin tener que resolver una serie de imprevistos, debido a la incapacidad del socio ruso para suministrar y justificar información al cliente.

Con respecto al producto desarrollado para ARIANE 5, CIMSA es Gerente de la UTE de empresas que se ha encargado del diseño y la fabricación del sistema de recuperación de los cohetes auxiliares del lanzador ARIANE 5, que en el momento en que se inicia este proceso tiene una masa de unas 40 toneladas. El sistema completo consta de 5 subsistemas: indicador de altitud, sistema de control, sistema de paracaídas, contenedor de los paracaídas, y los herrajes para el anclaje de los paracaídas.

El sistema funciona de la forma siguiente: permanece inactivo durante toda la fase de lanzamiento y hasta 10 segundos después de la separación de los cohetes auxiliares del principal, cuando se activa el indicador de altitud, una vez iniciado el descenso, a unos 20 km de altitud se activa el sistema de control, que iniciará la fase de recuperación con paracaídas a unos 4,5 km. En ese momento, se libera el cono superior del cohete, que arrastra un paracaídas auxiliar que permite desplegar un conjunto de tres paracaídas estabilizadores que actúan hasta una altitud aproximada de 1,5 km. En ese momento, se libera y extrae el sistema de frenado principal, que tiene una superficie total cercana a los 2.000 m, con el que los cohetes se frenan hasta una velocidad de unos 24 m/s antes del impacto en el mar. A partir de aquí, se inicia la recuperación marina.



- Equipo de I+D: En este programa han trabajado de forma conjunta los equipos de I+D de CIMSA y AFR, S.A., que han contado con la colaboración del Laboratorio de Aerodinámica de la ETSI Aeronáuticos, en algunos aspectos concretos.
- Datos de inversión: El importe total del proyecto en el transcurso de las distintas fases se ha situado en torno a los 1.200 M/ptas. La parte correspondiente a CIMSA ha sido en total de unos 400 M/ptas.

CRISA

Sus áreas de actividad corresponden a las siguientes: Electrónica de Vuelo, Equipos de soporte y de simulación en Tierra (EGSE's), Ingeniería y Desarrollo de Software, Redes de Comunicaciones, Centros de Control y Estaciones de Tierra.

Electrónica Secuencial del Lanzador ARIANE 5:

El equipo desarrollado es la Unidad electrónica llamada Electrónica Secuencial (ES). El número de unidades por lanzador es de cuatro equipos en dos versiones: 2 ES CASE situadas en la

caja de equipos, y 2 ES EPC alojadas en la etapa criogénica principal.

Las fases de proyecto suman siete años repartidos en una Fase inicial de estudio (4/89-10/89) y la Fase de Desarrollo (12/89-4/1996).

En el año 1995, se entregaron seis unidades de vuelo («Flight Models») y durante los años de desarrollo han trabajado en el grupo de proyecto una media de 12 personas.



Figura 2. Equipos para soporte de potencia en tierra. La misión de éstos es proporcionar energía suficiente al lanzador durante la fase inmediatamente anterior al lanzamiento. En la foto, equipos para soporte de potencia en tierra. (Foto ALCATEL ESPACIO.)

Funciones del Equipo:

Versión EPC: La parte superior de la etapa criogénica alberga todos los equipos de electrónica funcional necesarios para su combustión. Entre ellos se halla la Electrónica Secuencial (EPC). Esta unidad da la orden de disparo para el lanzamiento del cohete, actuando sobre todos los dispositivos pirotécnicos. Cuando el ordenador central envía la orden de arranque al motor Vulcain, la unidad remota recoge datos sobre el *status* de todos los relés, de toda la electrónica y los mecanismos relacionados con el motor. Es la propia unidad la que procesa los datos recogidos y si todo es favorable, da la orden definitiva de arranque. La unidad controla también las electroválvulas y con los datos que le llegan del ordenador central, comprueba que la mezcla de hidrógeno y oxígeno es la adecuada.

Versión CASE: Cumplimentada la orden de arranque, el lanzador se eleva y se va desprendiendo de sus elementos pirotécnicos. Nuevamente ahora, y antes de que su cumplimente la orden de separación de cada una de las etapas, otra unidad de Electrónica Secuencial (CASE), situada en el compartimento de equipos del lanzador, va analizando todos y cada uno de los elementos asociados a dicha etapa y, si todo es correcto, confirma la separación. La separación de cada etapa es comunicada al ordenador por la unidad central; un proceso importante, ya que, al separarse, la última etapa cambia por completo la configuración del vehículo.

IBERESPACIO

Las áreas de especialización de la empresa son éstas: Ingeniería de sistemas especiales, primordialmente en el área de modelización y simulación de sistemas de propulsión y control térmico; pruebas y ensayo de componentes; análisis de fiabilidad.

En concreto, los trabajos realizados en el desarrollo de ARIANE 5 corresponden a las siguientes facetas del proyecto: modelización y simulación de los sistemas del Conjunto Propulsivo Principal, Sistema de Presurización de tanques de Oxígeno e Hidrógeno líquido, Sistema de Control de la Etapa, Sistema de corrección del efecto POGO, Desarrollo del Recalentador de Helio del Motor Vulcain, Trabajos de modelización y análisis del motor de las etapas de refuerzo, Diseño, construcción y puesta a punto de sistemas de montaje y ensayo del conjunto propulsivo principal en Les Mureaux (Francia) y de las etapas de refuerzo en Kourou (Guayana).

El presupuesto de los trabajos de desarrollo llevados a cabo en ARIANE 5 suman aproximadamente 2.300 millones de pesetas y se han empleado en ellos 160 hombres/año.

IBERESPACIO, fundada en 1989, tiene un capital de 84.000.000 ptas. y cuenta con una plantilla de cincuenta personas, de los cuales el 90 % son ingenieros.

Su accionariado se reparte al 50 % entre la francesa Société Européenne de Propulsión (SEP) y los Empresarios Agrupados, de España.

GTD

Sus actividades en el programa ARIANE 5 son las siguientes:

- Realización del sistema de control y mando de las instalaciones de preparación y lanzamiento del cohete ARIANE 5 («CCS»): Este sistema fue concebido, construido, integrado y luego instalado en el Centro de Lanzamiento nº 3 de Kourou. El desarrollo del proyecto ha durado 3 años y lleva más de cuatro instalado en el CDL3 (Centro de Lanzamiento nº 3). Este sistema ha contribuido a realizar todas las pruebas preliminares sobre maquetas del cohete para lanzar el ARIANE 5.
- Centro de Control de las misiones ARIANE 4 y ARIANE 5 («CDC»): Éste es el sistema principal (centro neurálgico de la base) del Centro Espacial Guyanais. Este sistema informático, con más de 40 operadores especializados, realiza la cronología de lanzamiento. Es el encargado de centralizar, coordinar y autorizar el lanzamiento. (El director de operaciones es uno de los operadores del sistema.) Una vez efectuado el lanzamiento, este sistema supervisa toda las fases de vuelo y puesta en órbita de los satélites. El sistema está instalado en el edificio «JUPITER 2» del centro. Este sistema está siendo realizado por GTD y su versión 1.0 es operativa desde febrero del 96. La versión definitiva del sistema será entregada a mediados de 1997.
- Centro de coordinación de las operaciones de riesgo de la base espacial: El sistema controla, supervisa y autoriza las diferentes operaciones de riesgo según las consignas de salvaguarda imperativas de la base. Si un accidente ocurriera (escape de gases tóxicos, explosión...), el sistema indica, en tiempo real y en función de la localización de la población y de las condiciones meteorológicas, el plan de evacuación que debe ser aplicado por las autoridades civiles.
- Centro de tratamiento de datos meteorológicos operacional del Centro Espacial Guyanais: Este sistema informático es el encargado de analizar en tiempo real las condiciones climatológicas envolventes (medidas por diferentes fuentes de captación, radares, globos, etc.), en la fase de cronología. El sistema da la autorización «Meteo» al Centro de Control para realizar el lanzamiento.
- Por otra parte, GTD lleva a cabo permanentemente en Kourou, por cuenta de Arianespace y del CNES, tareas de mantenimiento y operaciones sobre estos sistemas.

Con respecto al programa de datos sobre inversiones en I+D relativos a ARIANE 5, éstos son los siguientes: Más de siete años de I+D continuo, 500 millones de pesetas de *staff* técnico, 200 millones en equipos y activos. Las previsiones hasta el año 2000 son de más de 400 millones para preparación de la tecnología en eventuales vuelos tripulados desde ARIANE 5.

EMPRESAS PARTICIPANTES

CASA ESPACIO
Dirección: CASA. Construcciones Aeronáuticas, S.A.
Avda. de Aragón 404. 28022 Madrid.
Tel. (91) 585 72 62.
Fax (91)585 72 74.
Presidente: Raúl Herranz.
Persona de contacto: José María Sanmillán (Director de Relaciones Públicas y Prensa).

SENER
Dirección: SENER. Ingeniería y Sistemas, S.A.
Avda. Zugazarte 56.
48930 Las Arenas (Vizcaya).
Tel. (94) 481 75 00.
Fax (94) 464 12 60 y (94) 464 43 22.
Presidente: Jorge Sengadorta (Consejero Delegado).
Persona de contacto: Álvaro Azcárraga (Director del Departamento Espacio).

CIMSA
Dirección: Paseo de la Habana 26
28036 Madrid.
Tel. (91) 563 17 44.
Fax (91) 563 36 23.
Presidente: Fernando de Caralt (Director General).
Persona de contacto: Miguel Ángel González Hernández (Director Técnico de ARIANE 5).

CRISA
Dirección: CRISA Computadores, Redes e Ingeniería, S.A.
Parque Tecnológico.
Torres Quevedo 9.
28760 Tres Cantos (Madrid).
Tel. 34-1-803 27 28.
Fax 34-1-803 65 28.
Presidente: Pedro Bernad.
Persona de contacto: Enrique Domingo (Director Comercial).

IBERESPACIO
Dirección: Ibérica del Espacio, S.A. (Iberespacio)
Glorieta de Quevedo 9.
28015 Madrid.
Tel. 34-1-594 48 11.
Fax 34-1-445 17 64.
Presidente: Juan F. Nebrera (Director General).
Persona de contacto: Jesús Sánchez (Jefe de Marketing).

GTD
Dirección: GTD. Ingeniería de sistemas y software industrial, S.A.
Rosa Sensat 9-11. Edificio Eurocity 2.
Tel. 34-3-225 51 25.
Fax 34-3-225 50 80.
Presidente: Carlos Kinder.
Persona de contacto: Marta Escudero (Responsable de la División Espacio en Barcelona).
Ana Madrigal (Responsable GTD en Centro de Lanzamiento Kourou).
Jordi Guitart (Responsable GTD en Centro Espacial Guyanais-Kourou).

ALCATEL ESPACIO
Dirección: Einstein 7.
28760 Tres Cantos (Madrid).
Tel. (91) 807 79 00.
Fax (91) 807 79 99.
Presidente: Miguel Ángel Canalejo García Echegoyen (Director General Alcatel Espacio).
Persona de contacto: Javier Hernández (Director Comercial y de Marketing).

COPRECI
Dirección: COPRECI, S. Coop. Ltda. (Departamento Sensores).
Avda. de Álava 3.
20550 Aretxabaleta (Guipúzcoa).
Tel. (943) 79 45 00.
Fax (943) 79 23 49.
Presidente: J.J. Arabaolaza.
Gerente: J.M. Arregi.
Persona de contacto: Georgia Theodorou.

AUXITROL IBÉRICO
Dirección: C/ del Caucho 18 .
28850 Torrejón de Ardoz (Madrid).
Tel. (91) 675 23 50.
Fax (91) 656 62 48.
Presidente: J.P. Bonnet (Director General).
Persona de contacto: Miguel Sancho.

ALCATEL ESPACIO

La participación en ARIANE 5 ha sido el suministro de los equipos llamados *Power Ground Support Equipment*. La misión de estos equipos (Bancos de potencia) es proporcionar energía suficiente al lanzador durante la fase inmediatamente anterior al lanzamiento, evitando así el consumo de las baterías.

Alcatel Espacio ha entregado veinticuatro de estos equipos por un importe total superior a 500 millones de pesetas.

COPRECI

La actividad del Departamento Sensores, integrado en la división de componentes electrodomésticos y electrónicos de MONDRAGÓN CORPORACIÓN COOPERATIVA, se inició en 1987 como resultado de la contribución española en los proyectos de la Agencia Espacial Europée (ESA). La participación consiste en la producción de sensores de presión absoluta, destinados a equipar los bancos de pruebas y, a partir de 1996, los cohetes ARIANE 5. Este sensor incorporado en las tuberías del motor Vulcano y de sus accesorios sirve para medir la presión del O_2 y H_2 líquido de forma que la combustión se produzca en las proporciones adecuadas.

El acuerdo COPRECI-CNES (Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia) se firmó en 1987, a la vez que otro de colaboración técnica y comercial con la empresa francesa Société Européenne de Propulsión (SEP).

Una vez adquirido el *know-how* de la fabricación de los sensores y de las tecnologías relacionadas, Sensores implantó el sistema de calidad exigido para productos con aplicación en la industria aeroespacial. Asimismo, estableció una serie de procedimientos como el de la calificación de sus proveedores, calibración de sus medios, etc.

En 1994, pasó a convertirse en «Maître d'oeuvre» de los sensores de presión absoluta para el cohete ARIANE 5.

AUXITROL IBÉRICO

La División Aeroespacial de Auxitrol está especializada en la concepción, desarrollo, cualificación y fabricación de sensores de medida de temperatura para aplicaciones aeronáuticas (aviones civiles y militares), aeroespaciales y armamento.

Para el programa ARIANE 5 ha desarrollado los sensores de temperatura destinados al motor Vulcain y los depósitos criogénicos. Son diez modelos de termopares y cuatro de sondas de termorresistencia de platino. Estos sensores, según el tipo, deben soportar unas condiciones de funcionamiento extremas, como por ejemplo, temperatura (20K a 1.500K), presión (hasta 400 bar), velocidad de los fluidos (hasta 500m/s.) y compatibilidad con oxígeno líquido o hidrógeno líquido.

La empresa participa con ARIANE 5 desde 1988. Durante la fase de desarrollo del motor Vulcain se ha suministrado para los bancos de ensayo varios miles de sensores. En 1994 se cualificaron «vuelo» seis tipos de termopares y tres tipos de termorresistencias de platino. En la actualidad se llevan fabricados cerca de 1.000 sensores habilitados «vuelo», y parte están integrados o en fase de integración para los primeros lanzamientos de ARIANE 5.

Las inversiones en equipamientos de fabricación, bancos de ensayos y medios de control han sido superiores a los 100 M/ptas., dedicando el 15 % de las ventas a I+D.

El equipo I+D está compuesto por personal de Auxitrol Francia y Auxitrol Ibérico, y en el desarrollo de los sensores ha participado un equipo de cinco a ocho personas, integrado por ingenieros, prototipistas y especialistas de calidad.

I.B. ■

UNA OPCIÓN ECONÓMICA DISCUTIDA

Didier Pavy

Un cohete de lujo para un mercado en plena evolución

DIDIER PAVY
es periodista económico. Reside en Bruselas.

Concebido con la óptica actualmente abandonada de los vuelos tripulados, el lanzador Ariane 5 llega en un momento en el que el mercado del lanzamiento de satélites se reestructura y se enzarza en una guerra de precios. Hay motivos para temer que los buenos tiempos de Arianespace llegan a su fin.

La mañana del 10 de junio de 1995, en Kourou, Hal McDonnell presentaba una amplia sonrisa. De ordinario más bien reservado, el vicepresidente de Hughes Space and Communications no ocultaba su satisfacción a los periodistas que habían asistido la noche precedente al lanzamiento del satélite de televisión DB3 por un cohete Ariane 4. La puesta en órbita fue perfecta: este satélite de 2,9 toneladas que costaba cerca de doscientos millones de dólares funcionaría doce años en vez de los diez inicialmente programados.

Para Direct TV, filial de Hughes Space and Communications especializada en la explotación y la comercialización en Estados Unidos de programas de televisión numérica, el éxito de este lanzamiento significaba unos buenos montones de dólares de suscripciones suplementarias. «*Thank you Arianespace!*»

La satisfacción mostrada por Hal McDonnell no era fingida. Este especialista del «*Business*» espacial duda sin embargo de que la próxima entrada en servicio del Ariane 5 le entusiasme mucho. En comité restringido, declara que «*Ariane 4 es un excelente lanzador, seguro y muy bien adaptado a la diversidad de la demanda. Creo que es una lástima que los europeos decidan no utilizarlo más*». La observación es pertinente: la configuración y el coste del nuevo cohete, ¿le permitirán resultar tan atractivo comercialmente como el modelo actualmente en servicio?

El pasado 12 de junio, en el Salón Aeronáutico de Bourget, Arianespace le encargaba catorce lanzadores Ariane 5 a la industria europea, comprometiéndose en un gasto de unos 2.300 millones de dólares hasta el año 2000, es decir unos 165 millones de dólares por lanzador. La diferencia de precio respecto a Ariane 4, vendido en promedio a unos 100 millones de dólares, parece considerable. Pero como el nuevo cohete podrá poner en órbita geoestacionaria una carga útil de 6,8 toneladas con un solo satélite o de 5,9 toneladas con dos satélites, en vez de las 4,4 toneladas de Ariane 44L, la versión más potente de Ariane 4, el precio de venta del kilo de satélite debería de ser parecido.

El futuro comercial de Ariane 5 estaría despejado si se le pudiese aplicar esta aritmética contable. Pero «*el precio del kilo satelizado no significa nada* —dice Patrice Larcher, jefe del servicio de marketing de Arianespace—. *En el transporte espacial lo que cuenta es el precio del mercado*». Y Ariane 5 va a entrar en servicio en un momento en el que, mientras que la oferta se intensifica, la demanda está a la baja. Por lo tanto, el sector entra en un periodo de guerra de precios y la práctica del descuento se generaliza casi tanto como en el sector agroalimentario y en el del automóvil.

Aparentemente, el paisaje del transporte espacial no se ha modificado mucho desde la explosión del Challenger, en enero de 1986, que provocó la retirada de la lanzadera espacial del mercado de los lanzamientos comerciales. Los lanzadores norteamericanos, europeos y asiáticos apenas han cambiado en los últimos diez años y no han impedido que Arianespace controle más del 50 % del mercado. Pero el hundimiento de la Unión Soviética ha generado cambios notables en la oferta de lanzamientos. Confrontados a la reducción drástica de los gastos militares, dos de los más importantes proveedores del Pentágono, Lockheed y Martin Marietta decidieron fusionarse en marzo de 1995. Lockheed Martin, el grupo nacido de esta asociación, se ha convertido en fabricante y explotador de dos lanzadores, Titán y Atlas, así como en la casa madre de dos constructoras de satélites, Martin Marietta Astro y la antigua RCA. Lockheed Martin tiene una cifra de negocios de 22.500 millones de dólares y 170.000 empleados. ¿Cómo va a rivalizar el grupo francés Aérospatiale, arquitecto industrial de Ariane y fabricante de satélites con un competidor dos veces y media mayor que él?

La alianza rusonorteamericana constituye el principal desafío a la supremacía espacial europea

El final de la guerra fría también ha hecho posible que Lockheed Martin se relacione con Khrunichev y Energia, los líderes de la industria espacial rusa. Los tres socios crearon en mayo de 1995 una sociedad conjunta, International Launching System, encargada de explotar los

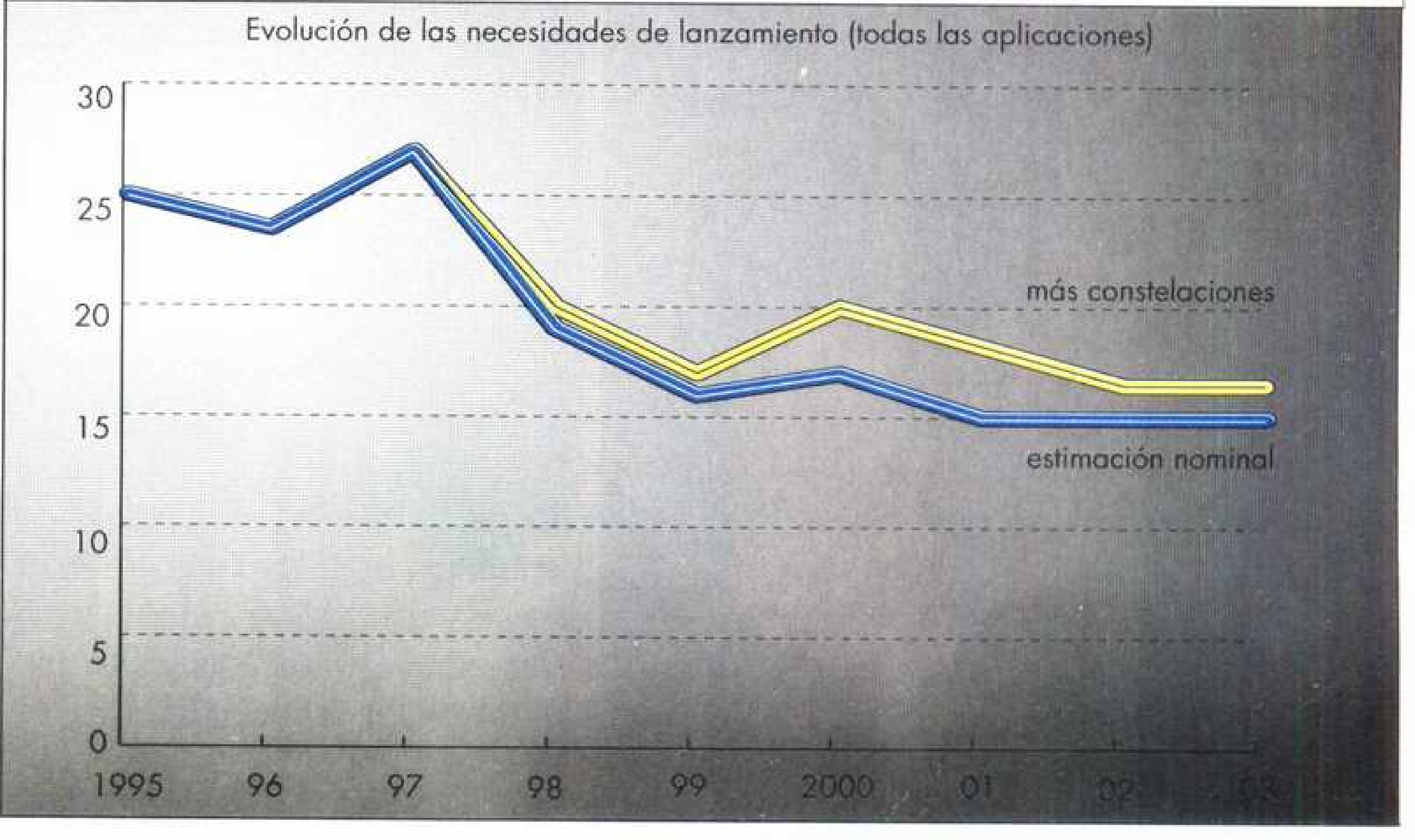


Figura 1. *El mercado de lanzamiento de satélites está en vía de retroceso. Como escribe Arianespace en* La Lettre Arinespace *de febrero de 1995 de la que se ha extraído el gráfico adjunto* «La oferta de lanzadores corre el riesgo de estar sobredimensionada».

dos cohetes norteamericanos y el lanzador Protón. Presentado desde hace varios años como un competidor temible para Ariane, el cohete ruso ve cómo se le abren las puertas del mercado occidental. *«Los rusos y los norteamericanos se han aliado claramente en el plano político y en el plano industrial. Por lo tanto nos espera una competencia difícil»* —reconocía Charles Bigot, presidente director general de Arianespace, en el Salón de Bourget—.

Además, Hughes Aircraft, primer fabricante mundial de satélites, le encargó el pasado junio diez cohetes a McDonnell Douglas en el momento en que ésta, proveedora acreditada del Pentágono, iba a abandonar sus actividades espaciales. El contrato de cerca de 1.500 millones de dólares firmado con Hughes la ha sacado adelante, permitiéndole desarrollar un cohete mejor adaptado a la nueva generación de satélites, que tendría que entrar en servicio en 1998. Boeing se prepara para proponer lanzamientos desde una plataforma petrolífera adaptada y un cohete rusoucraniano: la compañía de Seattle ya ha obtenido encargos de Hughes. Finalmente, la sociedad Great Wall Industry, con sede en Pekín, que explota el lanzador chino Larga Marcha, ha recibido la aprobación del gobierno norteamericano para lanzar 11 satélites comerciales occidentales hasta el año 2001. Sin embargo, este lanzador explotó en vuelo el pasado 14 de febrero, como ya lo había hecho el 26 de enero de 1995. Según los expertos, es de esperar una disminución de al menos el 15 % de los precios de lanzamiento a corto plazo, ya que los costes de producción rusos y chinos son muy inferiores a los de los occidentales.

La situación de la demanda no es menos movida que la de la oferta. Se estima que el número de satélites a colocar en órbita geoestacionaria oscilará entre 15 y 18 a partir de 1998. Respecto a los 25 ingenios lanzados en 1995, es una baja anunciada de cerca del 40 % del mercado. Se explica en especial por el peso creciente de estos satélites. Hace diez años, su masa media era de 2,4 toneladas y actualmente tiende a las 3,5 toneladas. Dotados de sistemas de retransmisión más potentes, concebidos para durar más tiempo, no hay necesidad de reemplazarlos tan a menudo como los ingenios de las generaciones precedentes. Esta evolución obliga a las empresas de lanzamiento a adaptar sus cohetes a las nuevas normas de los satélites.

La irrupción de operadores privados de telecomunicaciones altera los hábitos del sector espacial

La depresión previsible del transporte espacial se podrá compensar con los numerosos sistemas espaciales de comunicación con los elementos móviles (camiones, aviones, navíos...) en desarrollo al otro lado del Atlántico. Motorola prevé colocar en órbita baja 66 satélites de un peso de algunos centenares de kilos cada uno para su sistema Iridium. El proyecto Globalstar de Loral comprendía 48 pequeños satélites. Microsoft y Alcatel ambicionan montar otras *«constelaciones»* de pequeños satélites. Pero estos ingenios de pequeño tamaño serán accesibles a cohetes de menor potencia: los lanzadores japonés, indio, israelí y otros vectores específicos, incluso *«exóticos»* (como un cohete lanzado desde un avión) desarrollados por la industria aeronáutica en Europa y en Estados Unidos.

Finalmente, los operadores del transporte espacial se tienen que adaptar a diferentes interlocutores. En los años 80 sus principales clientes se llamaban Intelsat, Inmarsat, Eutelsat, France Télécom o Deutsche Bundespost: organizaciones internacionales y sociedades estatales más preocupadas por realizar misiones de servicio público que por optimizar sus inversiones. Con la desreglamentación de las telecomunicaciones y el desarrollo de cadenas privadas de televisión, ha aparecido una nueva generación de operadores de comunicaciones espaciales. Se trata de empresas privadas—Direct TV y Rimsat en Estados Unidos, Sociedad Europea de Satélites (que explota los satélites Astra) y BSkyB en Europa, Nippon Hoso Kyokai y APT Satellite en Asia—, ansiosas de rentabilidad y que no temen alterar los hábitos del sector espacial.

En este contexto tan competitivo, ¿cuáles son las fuerzas y las debilidades de Ariane 5? Arianespace, la sociedad que comercializa Ariane, está actualmente en una posición de fuerza. Controla más del 50 % del mercado mundial, y dispone de una lista de demandas de 37 satélites a lanzar hasta el año 2000. La excelencia de sus servicios, que ya no tiene que demostrar, justifica esta supremacía. Creada en



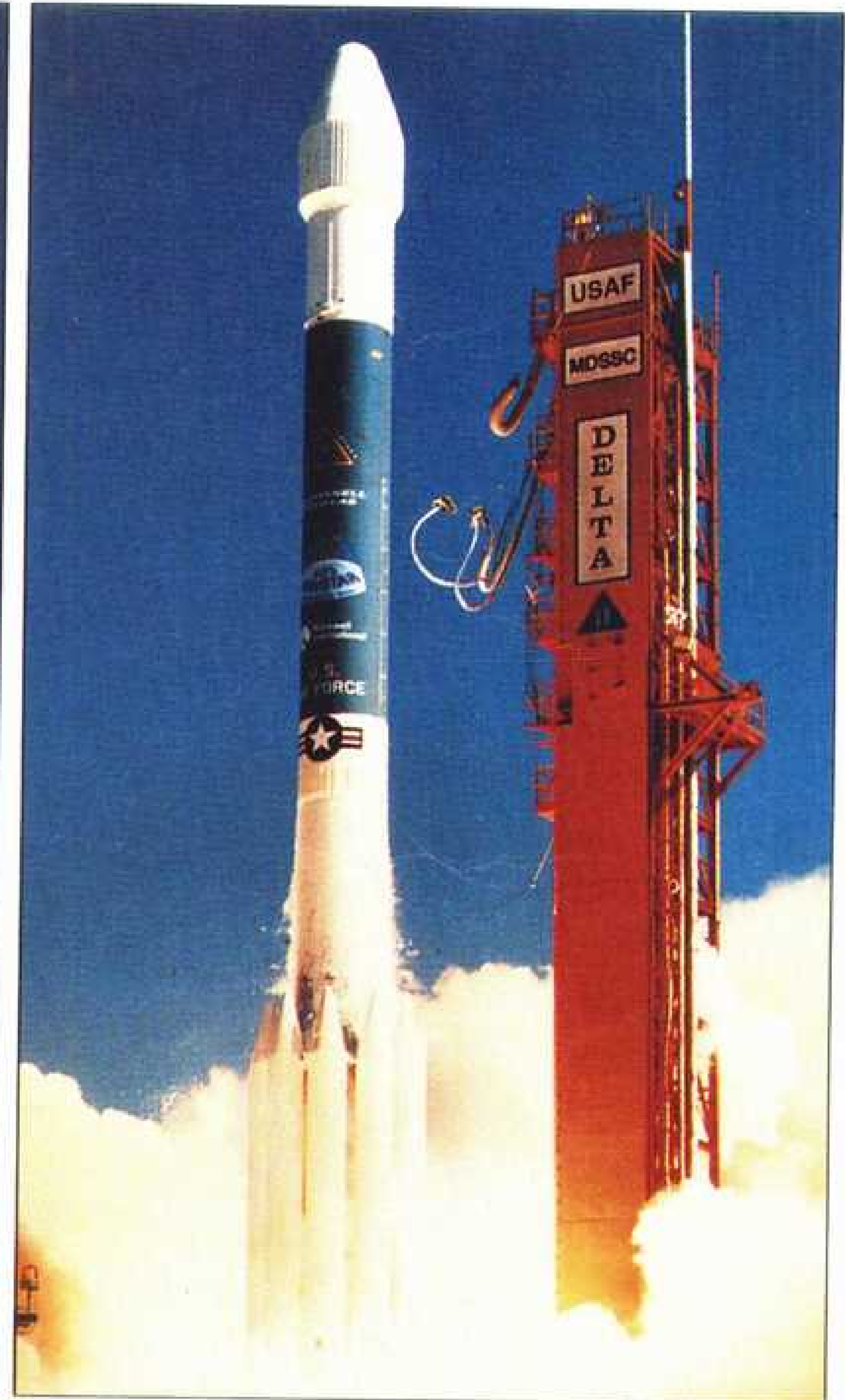




Figura 2. Los competidores de Ariane 5 *son numerosos: por ejemplo, de izquierda a derecha, el H2 japonés (durante su lanzamiento el 18 de marzo de 1995), el Delta II norteamericano de McDonnell Douglas, que en 1998 debería tener un sucesor más moderno, y el Larga Marcha chino (aquí el modelo 2-C, el 6 de octubre de 1992), cuya versión 3-B estalló no obstante el pasado 14 de febrero. (Fotos NASDA/Ciel et Espace, McDonnell Douglas/Ciel et Espace, CGWIC/Ciel et Espace.)*

1979 como una sociedad con objetivos comerciales, Arianespace ha sabido desarrollar un comportamiento de empresa privada que contrasta con la cultura militar de sus competidores norteamericanos. Un ejemplo: los equipos que preparan y realizan los lanzamientos de cohetes Atlas y Delta cuentan con unas 500 personas, frente a las solamente 200 que trabajan en Kourou, en el Centro Espacial de Guyana. La situación financiera de Arianespace, finalmente, es muy sana: desde hace 15 años distribuye dividendos a sus accionistas y sus reservas alcanzan los 700 millones de dólares. Los clientes de la sociedad europea entienden sin embargo que juega con un mercado con más demandas que ofertas. Cada vez son más los que le piden que revise sus tarifas a la baja. Obligada a conservar su mercado, Arianespace se ha fijado en consecuencia el objetivo de reducir en un 10 % los precios de lanzamiento de Ariane 5 respecto a los de Ariane 4. Esto exige un esfuerzo doloroso a los industriales. De hecho, el problema de Ariane 5 es que es un lanzador de gama alta. Con su nuevo cohete, Europa se presenta al mercado con un ingenio cuyo desarrollo habrá costado 7.300 millones de dólares; Lockheed Martin sólo ha gastado algo menos de 700 millones en la última versión del cohete Atlas. Esto se debe a que el nuevo lanzador europeo se ha concebido para realizar no sólo lanzamientos de satélites, sino también misiones tripuladas. De ahí su potencia, que le permite satelizar 20 toneladas en órbita baja terrestre y su nivel de fiabilidad, de casi el 99 % (superior en un 4 % al de Ariane 4). Esta fiabilidad sirve de argumento comercial y Arianespace incluso ofrece a sus clientes un relanzamiento gratuito de su satélite en caso de fracaso. La oferta es seductora, ya que la prima del seguro de dos satélites de tres toneladas embarcados en Ariane 5 puede acercarse a los 600 millones de dólares.

Pero de momento se han abandonado los vuelos tripulados. La Agencia Espacial Europea ha aplazado *sine die* la realización del avión espacial Hermes. Es cierto que los países miembros de la Agencia decidieron el pasado 20 de octubre en Toulouse iniciar la fabricación de un sistema de transporte de equipaje, llamado *Crew transport vehicle*, pero la decisión definitiva de realización de lo que no es más que una cápsula Apollo a la europea no se tomará hasta 1998.

Por lo tanto, Arianespace no se tiene que hacer demasiadas ilusiones de contratos destinados a la estación espacial internacional. Aunque Europa confirmó en Toulouse su participación en este vasto proyecto que asocia a norteamericanos, rusos, canadienses y japoneses, esta participación se revisó netamente a la baja respecto a lo que se había previsto en 1987 en La Haya, durante el consejo de la ESA que también aprobó la iniciación del programa Ariane 5. Norteamericanos y rusos, que son los que realmente controlan el proyecto, piensan evidentemente en utilizar de forma prioritaria sus propias naves espaciales para poner en órbita los elementos de la estación. En el mejor de los casos, la ESA prevé 0,7 lanzamientos al año por la participación de Ariane en la explotación del Columbus, el módulo europeo de la estación.

Otro inconveniente para Ariane 5: el aumento de peso de los satélites de telecomunicaciones a colocar en órbita geoestacionaria. El nuevo lanzador europeo ha sido concebido y optimizado por el CNES y la ESA para lanzamientos dobles. Pero con esta configuración, su carga útil, teniendo en cuenta los equipamientos necesarios para acoplar dos satélites en vez de uno solo en la parte superior del cohete, ya no es de 6,8 toneladas, sino de 5,9 toneladas. La versión de Ariane 5 está por lo tanto subdimensionada para ingenios que pesen más de tres toneladas. Los países miembros de la ESA aceptaron en octubre de 1995 destinar cerca de 1.400 millones de dólares para el desarrollo de un Ariane 5 Evolution. La entrada en servicio de esta versión, con una potencia aumentada en un 15 %, no está prevista hasta el 2003, mientras que el cohete norteamericano Atlas, muy adecuado para el lanzamiento de satélites de este tamaño, ya está disponible. Sin contar, como indica Jacques Durand, jefe del programa Ariane 5 en la ESA *«que la mitad de la demanda concierne actualmente a lanzamientos simples y que es cada vez más difícil encontrar un par de satélites a lanzar»*.

Por lo tanto, la media de ocho vuelos al año considerada en 1987 para el cohete europeo se tendría que rebajar a cinco o seis. Algo que incomoda a Arianespace en su voluntad de reducir los costes de producción del cohete. *«Para Ariane 4, nosotros proporcionamos en promedio siete motores Viking por lanzador* —dice Jean-Paul Rouot, director de relaciones comerciales de la Sociedad Europea de Propulsión—. *Con Ariane 5 no proporcionamos más que un motor Vulcano. Por lo tanto, los precios a que vendemos son muy sensibles a las cadencias de lanzamiento.» «Por debajo de cinco lanzamientos al año, las industrias pierden dinero. Tenemos absolutamente que seguir controlando el 50 % del mercado. Esto no es un objetivo, es una necesidad.»* La evolución del mercado del transporte espacial lleva a algunos expertos a preguntarse si el abandono de Ariane 4 en beneficio de Ariane 5 está bien fundamentado. En Arianespace se admite que *«Ariane 4 con sus seis versiones diferentes era muy práctico. Se podía modular, tener unos costes muy homogéneos respecto a la masa colocada en órbita»*. *«Pero la tecnología de Ariane 4 es compleja* —explica Jean-Marc Artaud, responsable por parte del CNES de las actividades de Ariane 5 en Guyana—, *requiere unos componentes que ya no se fabrican y producirlo sería cada vez más caro.»* Sin embargo, el cohete Protón data de los años sesenta y la nueva versión del lanzador Delta (llamado Delta 3) se desarrollará con los motores del Atlas Centauro, el cohete de la conquista de la Luna. *«Ariane 5 será el lanzador más moderno del mercado* —insiste Jean-Marc Artaud—, *seguirá siendo operativo dentro de veinte años.»* Fabricado en una época en que Air France y British Airways figuraban entre las compañías aéreas más potentes del mundo, el avión supersónico Concorde sigue siendo técnicamente muy seductor, casi veinte años después de su entrada en servicio. Lo que no impide que el mercado lo ignore... D.P. ■



Figura 3. Los lanzadores rusos, *como este cohete Protón fotografiado en 1989, no se tienen que olvidar ya que además de presentar la ventaja de sus costes bajos empiezan a disfrutar de la baza de alianzas norteamericanas. (Foto Jacques Paul/Ciel et Espace.)*

UN COHETE MUY ÁCIDO

Dorothée Benoit Browaeys

Ariane 5 será más perjudicial para el medio ambiente que Ariane 4

DOROTHÉE BENOIT BROWAEYS es periodista científica especializada en temas espaciales. Reside en Toulouse.

A diferencia de la propulsión de Ariane 4, la de Ariane 5 generará una notable contaminación ácida, afectará localmente a la capa de ozono y provocará unas deposiciones de aluminio que algunos investigadores consideran preocupantes.



Figura 1. El funcionamiento de los propulsores de combustible sólido (como aquí, en una prueba del P230 en Kourou, el 20 de junio de 1994) provoca la emisión de contaminantes, de los que el más deletéreo es el ácido clorhídrico.

Sinnamary. Mediodía. Las calles ocres de la pequeña ciudad de Guyana están desiertas. La canícula es agobiante y, además, todo el mundo está bajo techo esperando... el lanzamiento. Retumba la explosión. Este viernes 21 de julio de 1995 no hay ningún cohete en el cielo, sólo una prueba del «gigante»: todavía es tiempo de preparar el futuro Ariane 5. Por séptima vez desde 1993, uno de los dos propulsores de combustible sólido P230 del cohete entra en ignición. Mide 31 m de altura por 3 m de diámetro y contiene, distribuidas en tres segmentos, 237 toneladas de combustible sólido: 18 m de aluminio (el reductor), 68 % de perclorato de amonio (el oxidante), 14 % de un ligante de resina de tipo caucho, el polibutadieno hidroxitelequélico, PBHT y, en cantidades ínfimas, productos catalizadores como óxidos férricos para regular la velocidad de combustión y sales de metales para ayudar a la cocción. La ignición se produce en el banco de pruebas: se trata de una fosa de granito de más de veinte metros de profundidad, que hace las funciones de deflector. La explosión dura dos minutos, hace vibrar los alrededores con un terrible ruido sordo, y deja tras de sí un inmenso penacho de humo.

«*Al arder, el combustible emite un gas a 3.000 °C que sale de las toberas a un ritmo de dos toneladas por segundo*» —explica Jean-Pierre Garrec, director del Laboratorio de Estudio de la Contaminación Atmosférica de Champenoux (INRA-Nancy), en Francia—. Los componentes vuelven a caer en forma de aerosoles, unas gotitas de 1,3 micrómetros de diámetro medio. Según William Bonnet, que hasta enero de 1996 era subdirector responsable de la protección y del medio ambiente en el Centro Espacial de Guyana (CSG), «*cada prueba de booster desprende una nube constituida por 78 toneladas de aluminio, 64 toneladas de óxidos de carbono, 48 toneladas de ácido clorhídrico, 18 toneladas de nitrógeno, 7 toneladas de hidrógeno y 12 toneladas de vapor de agua*». Como el cohete tiene dos propulsores, cada lanzamiento Ariane 5 desprenderá el doble de estas cantidades. La diferencia con Ariane 4 es radical: los propulsores de este último contienen propergol líquido (hidracina y peróxido de nitrógeno) que durante la combustión vierte fundamentalmente óxidos de carbono y nitrógeno. Solamente produce emisiones cloradas cuando se «*dopa*» con propulsores de apoyo de combustible sólido (PAS), que sin embargo sólo contienen 10 toneladas de combustible cada uno.

Se observan efectos sobre la vegetación hasta treinta kilómetros del lugar de lanzamiento

El Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES) recibió en 1987 el encargo de la Agencia Europea del Espacio de realizar un estudio de impacto de la nueva versión del lanzador europeo. Este estudio es un requisito necesario para obtener la autorización de utilización, según la ley francesa de Protección de la Naturaleza del 10 de julio de 1976. Sin embargo, el estudio no se inició hasta 1993 y hubo que esperar a 1994 para que el CNES destinase 1,3 millones de francos al seguimiento de los efectos de los residuos de combustión en la vegetación y los animales. Las siete pruebas realizadas entre febrero de 1993 y julio de 1995 para probar las «*fases de aceleración de combustible sólido*» fueron acompañadas de mediciones en el medio ambiente y de una simulación de dispersión según las condiciones meteorológicas. Este trabajo, que ha implicado a numerosos organismos científicos franceses (INRA, ORSTOM, CIRAD, ONF,[*] Museo de Historia Natural, Escuela Nacional Veterinaria de Toulou-

INRA
Instituto Nacional de Investigación Agronómica, en Francia.

ORSTOM
Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación.

CIRAD
Centro Internacional de Investigaciones Agronómicas y Desarrollo.

ONF
Oficina Nacional de Bosques, en Francia.



Figura 2. *El lanzamiento de Ariane 4* *se traduce en el vertido de óxidos de carbono y de nitrógeno, con efectos medioambientales mucho menos importantes que los debidos a la acción del propergol sólido.*

se, Universidad de Nantes, etc.) concluyó con un informe realizado por Bernard Munoz, del CNES, integrado en la *Solicitud de autorización para utilizar el conjunto del lanzamiento»* nº 3.[1] La autorización de utilización la dio la prefectura de Guyana en enero de 1996, después del dictamen favorable sobre el estudio de impacto de Charles Souleau, decano de la Facultad de Farmacia de Chatenay-Malabry. ¿Cómo se desarrolló el estudio? En febrero de 1990, después de la explosión de un cohete Ariane 4, el CNES contrató a un biólogo, Romain Garrouste, que en 1993 recibió el encargo de coordinar el estudio de impacto. El 16 de febrero de 1996 se llevó a cabo la primera prueba del *booster*, bajo la vigilancia atenta de los biólogos (prueba B1). Siguieron otras seis (M1 el 25 de junio de 1993, M3 el 20 de junio de 1994, M4 el 20 de septiembre de 1994, M5 el 15 de diciembre de 1994, O1 el 10 de marzo de 1995 y O2 el 21 de julio de 1995). Los investigadores también observaron los efectos de las quemas: se trata de la eliminación de las columnas de combustible resultantes de coladas defectuosas, fisuradas o que contienen burbujas, que no se pueden utilizar, ya que sus defectos podrían alterar la regularidad del empuje. El humo se eleva en este caso mucho menos puesto que el escape se realiza sin tobera, a menos presión.

En su informe sobre la prueba M1 del 25 de junio de 1993, Olivier Tostain, ornitólogo del Museo de Historia Natural de París, describe «*depósitos de finas cenizas y granos blancuzcos en todas las superficies foliares visibles del borde de la pista Barthod* [a algunos kilómetros del lugar de la prueba]. *Estos depósitos no existían los días precedentes, en particular la víspera por la tarde* [...]. *Durante la semana siguiente, constatamos un número inhabitual de agujeros en las hojas expuestas, y supusimos la existencia de una relación entre los depósitos del 16 de febrero y estas necrosis*».[2] Partículas de arena arrancadas del banco de pruebas y cargadas de ácido se encontraron a más de ocho kilómetros de la zona de pruebas. Según William Bonnet, «*la arena que cae, procedente de la erosión del granito del banco, contiene un 0,5 % de ácido clorhídrico y un 12 % de aluminio*».

«*He observado hojas acribilladas de agujeros en los* árboles cañón, *unos árboles muy comunes alrededor de Kourou* —cuenta Claude Petit, toxicólogo de la Escuela Nacional Veterinaria de Toulouse (ENVT), que era el encargado de observar los efectos de los vertidos en ratas durante las pruebas B1 y M1—. *Las hojas primero se agujerean, luego los agujeros se fisuran y se agrandan, hasta formar unas lesiones características, muy diferentes de las innumerables manchas de roya generadas por hongos*». Estos efectos se han observado más allá de Sinnamary, a 30 km de Kourou. Los mismos instrumentos de medida se encontraron piqueteados. Por su parte, Jean-Pierre Garrec pudo medir el aumento de los contenidos de aluminio y de cloro de un árbol, el *árbol cañón*: «*En una radio de 15 km alrededor del banco de pruebas, el contenido en cloro aumenta en un 10 % y el de aluminio en un 30 %*». Estos valores son compatibles con fluctuaciones naturales, según el investigador.

Modelos de disipación de la nube realizados para Ariane 5 describen una lluvia ácida (pH 1) en un *cono* de 500 ha orientado en la dirección del eje del viento dominante este-nordeste. Catherine Grimaldi (INRA-Versailles), encargada de estudiar las aguas de lluvia, de los mantos freáticos y de los ríos, comprobó una acidificación del río Passoura durante cinco días después de la primera prueba. «*El pH del agua cayó a 4,6 en vez de su valor habitual de 5.*»

Jean-Pierre Garrec colocó, durante la prueba M3, una red de plantas de rábano (una especie muy sensible al ácido clorhídrico HCl) hasta 15 km del lugar de la prueba, en la nacional RN1, que une Cayenne con Saint Laurent de Maroni. Sus colaboradores que permanecían en el lugar, Christophe Rose y Gilles Nourisson, vieron «*caer la lluvia y cubrirse el automóvil de polvo blanco*». Las hojas de rábano se necrosaron rápidamente.

El efecto medioambiental de los lanzamientos de Ariane 5 se añadirá a los de la presa de Petit-Saut

Claude Petit colocó ratas en jaulas en los alrededores del banco de pruebas durante las pruebas B1 y M1. «*Hice traer 60 ratas de la metrópoli que coloqué en cuatro lugares distintos. Algunas, en la primera prueba, presentaron lesiones pulmonares graves más o menos sobreinfectadas, especialmente el lote situado a 4 km del banco. Durante la segunda prueba, se encontraron lesiones similares en animales situados a 12 km del lugar de la prueba, en la carretera RN1. Marsupiales de la especie oposum lanoso de cola desnuda* (Cauromys philander) *capturados en los mismos lugares estaban afectados de una manera similar. Por lo tanto he preconizado, aunque esto no corresponda a mis prerrogativas, que se prohíba la circulación por la carretera durante las dos horas siguientes a los futuros lanzamientos. Tal exposición puede en efecto ser peligrosa, especialmente para los individuos asmáticos.*» Tras la prueba M1, los gendarmes sufrieron irritaciones de garganta. El ácido clorhídrico contenido en las gotitas atmosféricas es sin duda el culpable, ya que puntualmente se encontraron niveles superiores a 10 partes por millón —el valor considerado como umbral de toxicidad respiratoria del HCl—. Pero las correlaciones son difíciles de establecer, ya que no se ha determinado con precisión la cantidad de ácido clorhídrico que cae al suelo. «*La simple medición con aparatos automatizados no proporciona una informa-*

¿Y LA LANZADERA ESPACIAL?

Los despegues de la lanzadera espacial norteamericana no son menos contaminantes que los proyectados con Ariane 5: Challenger, Discovery y Endeavour también recurren al propergol sólido. Cada uno de sus lanzamientos quema 1.200 toneladas de material, es decir más del doble de lo que consumen los dos propulsores sólidos del cohete europeo. Pero el emplazamiento de Cabo Kennedy, en Florida, *Alias* Merritt Island, es muy diferente al de la selva guyanesa. Se trata de una laguna de agua salobre que diluye los compuestos. Allí, la mortalidad de peces es notable y en la cuenta del aluminio se tendrán que incluir anomalías de las branquias. Un documento de la NASA de julio de 1984 cita varios incidentes.[7] El vuelo STS-11 del 3 de febrero de 1984 roció con ácido clorhídrico una zona de 22 hectáreas. El agua de la laguna, muy acidificada, no recuperó su equilibrio hasta tres días más tarde. En 1967, una prueba de *booster*, que se desarrolló bajo la lluvia y el viento, provocó daños en los cultivos de limoneros y aguacates a 10 km de distancia. Igualmente, en 1975, un cohete Titán Centauro despegó unos minutos antes de un gran huracán cuyas lluvias alcanzaron un pH de 1, un nivel de fuerte acidez que quema la vegetación. Los productores de agrios de los alrededores obtuvieron subvenciones por pérdidas en las cosechas.

Respecto al ozono estratosférico, un estudio de la NASA precisa que «*un ritmo anual de lanzamientos de nueve lanzaderas y seis Titán aportaría una dosis de cloro equivalente al 0,25 % de las cantidades aportadas por los actuales halocarbonos*».[8]

Las cantidades de cloro liberadas por los cohetes de combustible sólido son, en efecto, consecuentes y alcanzan por ejemplo del orden de 90 t en el caso de Ariane 5. La NASA destaca además que en la estela del vertido de los cohetes, el nivel de ozono puede caer un 80 % durante algunas horas.

La NASA prepara un lanzador más potente llamado *New Solid Rocket Motors* (NSRM). Después de haber buscado durante mucho tiempo un emplazamiento para las pruebas, éstas se realizan en una base militar en Mississippi. Lejos de las miradas

D.B.B.

(1) Ref. csg/es/s3s/000079/seer, CNES, Kourou, enero 1995. Este documento comprende seis volúmenes, dos de ellos sobre el estudio de impacto.

(2) *Résultats et analyses des mesures d'environnement réalisées pour le premier essai d'un propulseur à poudre d'Ariane 5 au Centre spatial guyanais*, anexo 8, Ref. CG/SDP/SE/ER/92/nº 235, CNES, Kourou, 30 de abril de 1993.

ción adecuada, ya que da un contenido correspondiente a un muestreo continuo —indica Claude Petit—. *Y, desde el punto de vista toxicológico, lo importante es la cantidad presente en un momento dado, que eventualmente supera el umbral, y no el promedio, medido durante una hora o más».*

Poco después de haber subrayado el riesgo sanitario de estas deposiciones de ácido clorhídrico, Claude Petit fue apartado de los estudios. Su propuesta de una *«monitorización de los efectos de las emisiones gaseosas de Ariane 5 en las faunas mamífera y aviar»* no se ha tenido en cuenta. Ahora le sustituye el Laboratorio de Ecotoxicología de Jean-Claude Amiard, de la Universidad de Nantes, que no efectúa trabajos en el lugar. El Laboratorio recibe muestras no identificadas, de las que se le pide que realice determinaciones del aluminio. *«No se sabe lo que se recibe* —dice Jean-Claude Amiard—. *Nosotros no hacemos ninguna interpretación».*

«El CNES no tiene un programa coherente de investigación ecológica —dice Jean-Pierre Garrec—. *De vez en cuando nos consulta, sin un contrato permanente, lo que hace imposible cualquier seguimiento. Cada cual trabaja en lo suyo y se le exige que no divulgue sus resultados sin permiso del CNES.»* Pero, sin síntesis de información, un estudio ecológico no tiene mucho sentido. Aunque el CNES no es avaro de documentos, cifras, gráficas y tablas, todos estos datos son difícilmente utilizables, ya que no están correlacionados. En cuanto al único biólogo del Centro de Guyana, Romain Garrouste, fue repatriado a París al principio de 1995.

Cerca del lugar de lanzamiento de Ariane 5 se ha construido una factoría de fabricación de combustible sólido gestionada por la firma Regulus, filial común de la Societé National de Poudres et Explosifs (SNPE) y de Fiat-BPD. Estos dos grupos mantienen en secreto la fórmula de los catalizadores que le proporcionan al combustible su rendimiento. Estos compuestos podrían ser la causa de las lesiones pulmonares que se han detectado en las ratas expuestas. *«Un estudio realizado con ratones en la Escuela Nacional Veterinaria de Toulouse demuestra que se necesita unas cien veces más ácido clorhídrico que el medido en el lugar de las pruebas para obtener las mismas lesiones»* —dice Claude Petit—.

Otro motivo de preocupación: los vertidos de aluminio. En las plantas, el aluminio bloquea el funcionamiento de las raíces, lo que induce carencias minerales. *«Pero en este mar de aluminio que son los suelos tropicales cargados de bauxita, las emisiones de los propulsores del cohete Ariane quizá no son más que una gota de agua* —estima Claude Petit—. Por su parte, Jean-Pierre Garrec indica que *«en cambio, la acidez debida al ácido clorhídrico solubiliza el aluminio y por lo tanto lo vuelve más asimilable y peligroso. Las lluvias ácidas abren la puerta de las raíces al aluminio, que entonces es más peligroso. Este efecto indirecto podría ser la causa de la depauperación de los bosques de los Vosgos, regados continuamente por lluvias ácidas de pH 4,5. En Guyana, con los lanzamientos de Ariane 5, habrá "choques ácidos" frecuentes. Pero se desconoce la capacidad de recuperación de la selva guyanesa.»* Para el hombre, el peligro sería que las aguas potables se contaminasen. El aluminio es un neurotóxico con efectos crónicos graves. En particular, está implicado en la enfermedad de Alzheimer: unos estudios epidemiológicos realizados en Gran Bretaña han detectado una correlación entre el contenido de aluminio del agua destinada a la bebida y la incidencia de esta enfermedad.[3] El estudio de impacto del CNES señala que el consumo diario de aluminio no tiene que pasar de 30 mg. Según Claude Petit, *«nada en el estudio menciona una investigación del aluminio en las aguas potables de Sinnamary y de Kourou».* Según las determinaciones realizadas en muestras de tierra extraídas después de una prueba, cada metro cuadrado sobre el que ha pasado la nube de combustión recibiría alrededor de un gramo de aluminio. Pero no se ha observado ninguna transferencia de este elemento ni a los pájaros ni a los marsupiales. *«No obstante, nos falta perspectiva. Sólo un seguimiento durante varios años puede permitir saber si algunos animales y plantas sufren un envenenamiento crónico por acumulación de aluminio»,* estima Claude Petit. *«Recientemente, dos veterinarios han analizado el contenido digestivo de un marsupial capturado en Paracou (a 15 km del lugar de lanzamiento). Han encontrado un contenido elevado de 1,38 g de aluminio por kg.»* Desde luego este resultado es difícil de interpretar, en la medida en que los suelos rebosan de aluminio.

Finalmente, las 90 toneladas de ácido clorhídrico procedentes de los dos propulsores también pueden afectar al ozono estratosférico tan precioso para detener los rayos ultravioleta. El Centro de Ciencia Atmosférica de la Universidad de Cambridge anuncia una disminución anual del 0,1 % del ozono de la alta atmósfera con un ritmo de diez lanzamientos de Ariane 5 al año[4] pero concluye que *«el impacto es despreciable».* En su estudio de impacto el CNES señala: *«En el caso de las partículas sólidas de aluminio, el problema de saber si pueden desempeñar una función de catalizador en las reacciones de destrucción del ozono está abierto».*[5]

La Oficina Nacional de Estudios e Investigaciones Aeronáuticas ha propuesto un seguimiento continuo de los niveles de ozono sobre Kourou que no se ha tenido en cuenta.

Los lanzamientos de Ariane 5 se tendrán que realizar cualquiera que sea la situación meteorológica, si son favorables desde el punto de vista técnico, indica Alex Agapit, responsable de la división Salvaguardia y Medio Ambiente del CNES. Si los vientos soplan hacia Sinnamary, una ciudad de 6.000 habitantes, o si amenaza lluvia, no se modificará la programación. No se ha previsto ninguna condición sobre los lanzamientos para limitar los efectos medioambientales. En su conclusión, el estudio de impacto del CNES se contenta con señalar que *«el problema de las lluvias y los vertidos ácidos no está totalmente resuelto [...] En lugares distantes (3 a 40 km), la gamma-alúmina es uno de los factores fundamentales en la formación de las lluvias ácidas».*[6]

Ya afectados por la presa de Petit-Saut que vierte un agua que se ha vuelto muy ácida al río Sinnamary, los alrededores de Kourou (una ciudad de 15.000 habitantes situada a 17 km al sudeste del banco de pruebas) estarán sometidos a una fuerte presión medioambiental.

D.B.B. ■

PROPERGOLES SÓLIDOS NO CONTAMINANTES

Los diferentes países implicados en la aventura espacial estudian sustitutos del perclorato de amonio, el principal responsable de la contaminación ácida debida a los propulsores de lanzamiento de Ariane 5. La presión normativa que se empieza a ejercer en Estados Unidos se hace notar. Principalmente se exploran tres vías. De una parte, la inserción de captores de cloro, moléculas a base de sodio que se combinan con el cloro para formar cloruro de sodio en el momento de la combustión. Pruebas a pequeña escala han demostrado la eficacia de este procedimiento, cuyo principal inconveniente es que reduce el rendimiento energético del propergol. De otra parte, se intenta sustituir el perclorato de amonio por otras cargas oxidantes desprovistas de cloro. Una solución sería recurrir a los combustibles sólidos empleados en los misiles tácticos actuales, que son ésteres nítricos. Aunque ofrecen unos rendimientos interesantes, plantean enormes problemas de seguridad, ya que son extremadamente explosivos. Lo que es admisible en un marco militar y en misiles que contienen menos de una tonelada de propergol, es difícilmente admisible, con los conocimientos actuales, en unos propulsores de más de 200 toneladas. La otra solución, que parece más prometedora, consiste en estudiar nuevas familias de moléculas, como las DNA (dinitramida de amonio). Tienen rendimientos interesantes en el plano teórico, pero falta verificar que sucede lo mismo en una situación industrial.

H.K.

(3) Martyn *et al.*, *Lancet*, *1*, 59-62, 1989.
(4) A.E. Jones, S. Bekki, J.A. Pyle, *J. Geophys. Res.*, *100*, 16651-16660, 1995.
(5) Ref. CSG/ES/S3S/000079/SE ER, enero 1995, p. 237, vol. 2.1.
(6) Idem, p. 243.
(7) *Acid deposition, pH and inorganic carbon interactions: laboratory simulation of space shuttle, launch cloud, effects on estuarine systems, Technical memorandum*, 83-094.
(8) R.S. Harwood *et al.*, «Predicted rocket and shuttle effects on stratospheric ozone», en: *Scientific assessment of ozone depletion 1991*, Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, 1991.

EL SATÉLITE ESPAÑOL UPM-Sat 1

Ángel Sanz y José Meseguer

Unos objetivos educativos, tecnológicos y científicos

ÁNGEL SANZ es profesor titular de Aerodinámica de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).
JOSÉ MESEGUER es catedrático de Aerodinámica de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

El 7 de julio de 1995, sobre las 18.20 hora española, se puso en órbita el pequeño satélite universitario español UPM-Sat 1, diseñado, construido e integrado por profesores y alumnos de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). El lanzamiento tuvo lugar desde el Puerto Espacial Europeo de la Guayana Francesa, en el vuelo V75 de un lanzador Ariane 4-40 que transportó al espacio tres satélites: el satélite principal Helios, de aplicaciones militares, y los satélites secundarios UPM-Sat 1 (figura 1) y Cerise, un pequeño satélite francés de características geométricas y másicas semejantes a las del satélite universitario español. Desde ese día el UPM-Sat 1 sigue una órbita polar heliosíncrona a 670 kilómetros de altitud, desplazándose a una velocidad de 7 km/s, de modo que completa una vuelta alrededor de la Tierra cada 98 minutos. El UPM-Sat 1 pasa sobre España varias veces cada día entre las 1.30 y 2.30 de la tarde y entre las 2 y las 3 de la madrugada.



Figura 1. ***Detalle de la cofia del lanzador*** *Ariane 4-40 correspondiente al lanzamiento V75 donde se pueden apreciar los anagramas del satélite principal Helios y del pequeño satélite de la Universidad Politécnica de Madrid UPM-Sat 1. (Foto: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.)*

El UPM-Sat 1 es un satélite científico y de demostración tecnológica en órbita, pero la faceta más destacable de este proyecto ha sido su carácter educativo. El UPM-Sat 1 se planteó como un medio, y no como un fin, para habilitar un marco de actuación en el que profesores, alumnos y personal auxiliar de la UPM pudieran aprender, mejorar y ampliar los conocimientos existentes sobre las particularidades de la tecnología espacial, con el ánimo de establecer y consolidar en el seno de la Universidad Politécnica de Madrid un núcleo orientado hacia la enseñanza, la investigación y el desarrollo en el ámbito de la ingeniería específicamente espacial. Dado su carácter educativo, el primer objetivo del proyecto era el propio satélite: se trataba de comprobar la capacidad de la Universidad Politécnica de Madrid para desarrollar y operar un ingenio espacial de prestaciones modestas, pero que conservara en su ejecución toda la complejidad de un sistema espacial completo.

Además de este objetivo principal hubo otros relacionados con el uso de los puentes líquidos como acelerómetros de uso espacial y con la tecnología de nuevos paneles solares. El satélite lleva una carga útil relacionada con el comportamiento de los puentes líquidos en ingravidez cuya finalidad es analizar la posibilidad de utilizar los puentes líquidos como acelerómetros en un ambiente espacial, midiendo la deformación que experimenta una columna líquida cuando está sometida a muy pequeñas aceleraciones. Además de este experimento, gracias a un acuerdo de cooperación establecido con el Centro de Investigación y Tecnología Espacial

de la Agencia Espacial Europea (ESA/ESTEC, Noordwijk, Holanda) para utilizar el UPM-Sat 1 como plataforma para demostración tecnológica en órbita, el UPM-Sat 1 lleva también tres experimentos relacionados con nuevas tecnologías de paneles solares, dos de ellos en el marco del citado acuerdo con ESA/ESTEC y otro de carácter estrictamente nacional. El primero de estos experimentos tecnológicos está relacionado con el uso de nuevos interconectores de aluminio para paneles solares de aplicación espacial, y se ha desarrollado en colaboración con la empresa alemana DASA y ESA/ESTEC, que suministró, a coste cero, uno de los paneles de células de silicio utilizados en el satélite. El segundo es sobre células solares de arseniuro de galio, en este caso la colaboración ha sido con la empresa italiana FIAR y ESA/ESTEC, que suministró, también sin coste alguno para el proyecto, el panel de células de arseniuro de galio que lleva el satélite. El tercero es sobre células solares de silicio de emisor profundo n+pp+, dos pequeñas células solares que van montadas sobre la parte inferior de una de las caras del satélite y que han sido desarrolladas específicamente para este proyecto por el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid.

El proyecto UPM-Sat 1 ha sido posible gracias al esfuerzo de más de 70 personas, entre profesores, alumnos y personal auxiliar de la UPM, y gracias a las subvenciones aportadas por la Fundación Caja de Madrid, dentro de un convenio suscrito con la Comunidad Autónoma de Madrid, por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT), por la propia Universidad Politécnica de Madrid y también por las donaciones de materiales y servicios de ESA, CASA/División Espacio, CRISA, INTA, IBM y otras empresas e instituciones. El coste total del proyecto, incluido el lanzamiento y el segmento de tierra, pero no el coste de los salarios de las personas ligadas a la Universidad Politécnica de Madrid, se ha situado en torno a los 200 millones de pesetas. En la tabla 1 se resumen los hitos más significativos del proyecto UPM-Sat 1.

El modem transforma los datos enviados por el ordenador, o los procedentes del receptor, empleando modulación de mínima desviación de fase

El satélite UPM-Sat 1, cuya masa total es de 47 kg incluido el sistema de separación, ha sido diseñado teniendo en cuenta las limitaciones geométricas y másicas y los requisitos de rigidez y esfuerzo que han de cumplir las cargas de pago secundarias lanzadas por Arianespace. El satélite tiene forma paralelepipédica, con el objeto de aprovechar al máximo la envolvente geométrica permitida por el lanzador, con una base cuadrada de 450 mm de lado y una altura de 534 mm, sin incluir la antena ni el sistema de separación. Los subsistemas que conforman el UPM-Sat 1 son, como en todo vehículo espacial, el subsistema estructural, el de control de actitud, el de control térmico, el de gestión de energía, el de gestión de datos y el de comunicaciones.

La estructura sirve para soportar las cargas que se producen en todas las operaciones críticas del satélite (transporte, lanzamiento y separación), y los elemen-

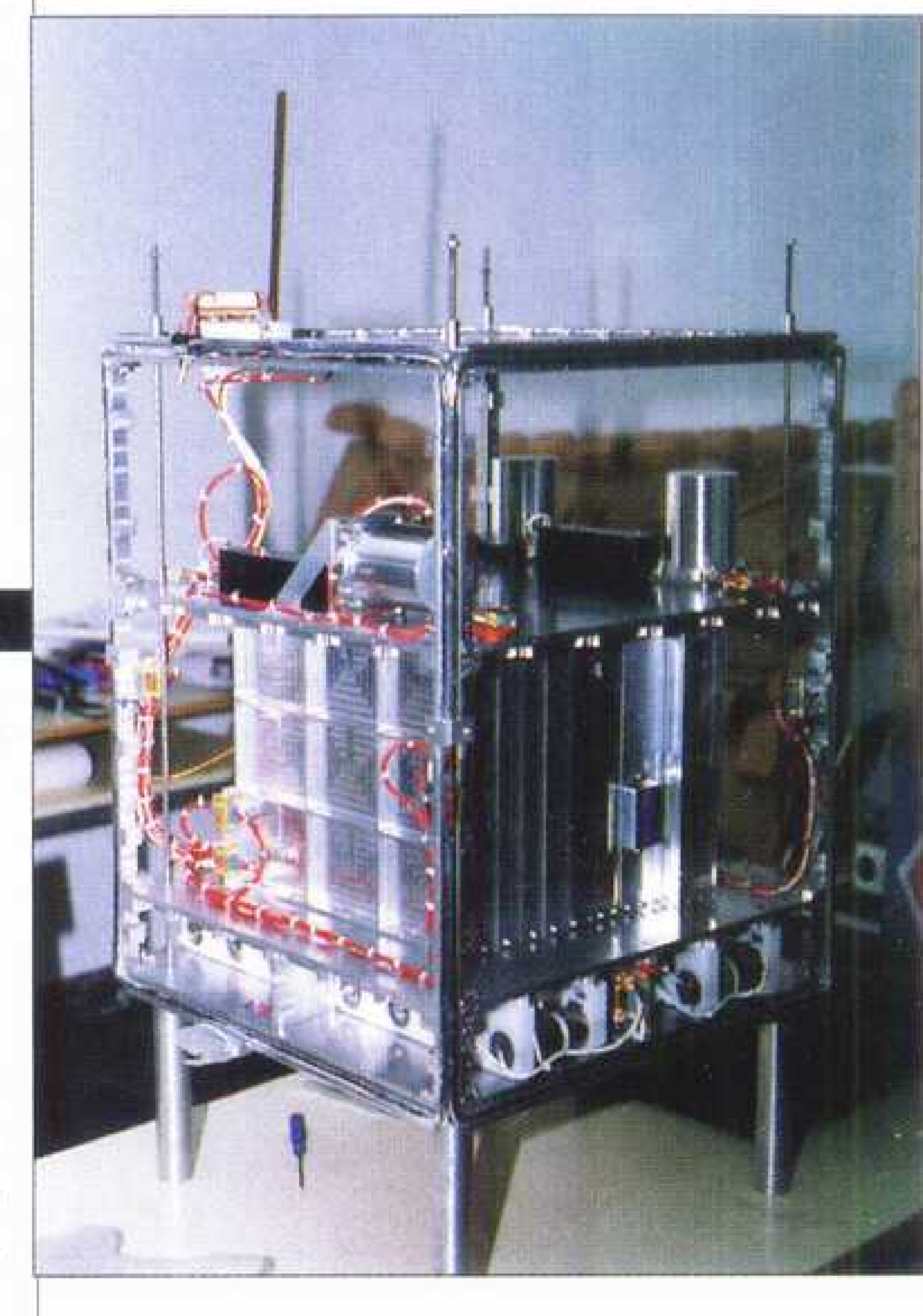


Figura 3. El satélite UPM-Sat 1 durante la etapa de integración. En la fotografía se pueden observar la estructura, las baterías situadas en la bandeja inferior, la caja de la electrónica, los botes estancos que encierran los magnetómetros y girómetros y el cableado. (Foto: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.)

MANTA AISLANTE TÉRMICA
CARGA ÚTIL(EXPERIMENTO)
ANTENA
MAGNETOPARES
GIRÓSCOPOS
MAGNETÓMETRO
ORDENADOR Y ELECTRÓNICA DE CONTROL
CÉLULAS SOLARES
MANTA AISLANTE TÉRMICA
BATERÍAS

Figura 2. Perspectiva detallada del satélite UPM-Sat 1. (Fuente: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.)

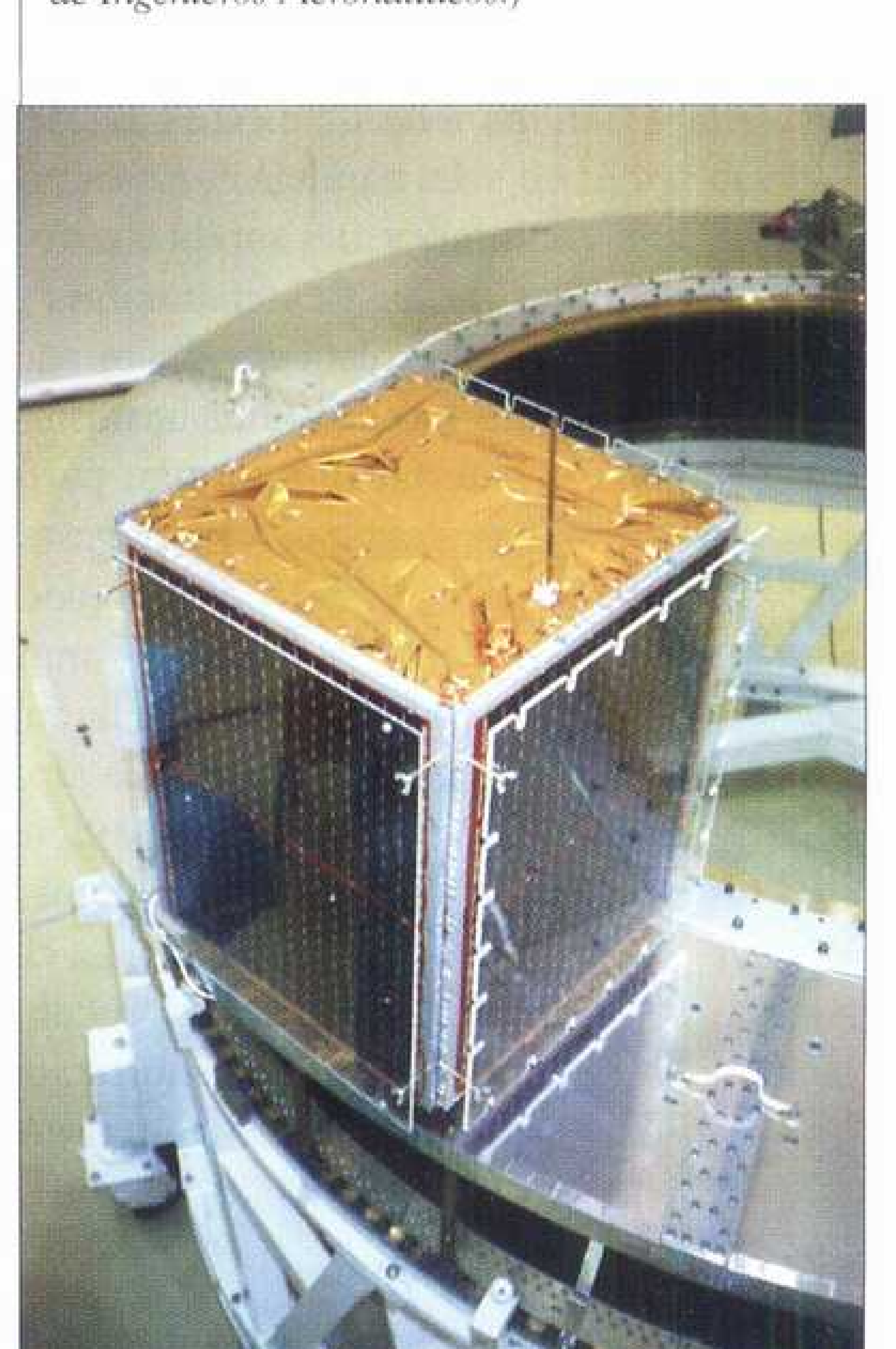


Figura 4. Vista general del UPM-Sat 1 donde se muestra la manta térmica multicapa que recubre la cara superior del satélite. Las láminas de material plástico transparente que recubren los paneles solares tienen por finalidad la protección de los mismos durante las operaciones en tierra previas al lanzamiento. (Foto: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.)

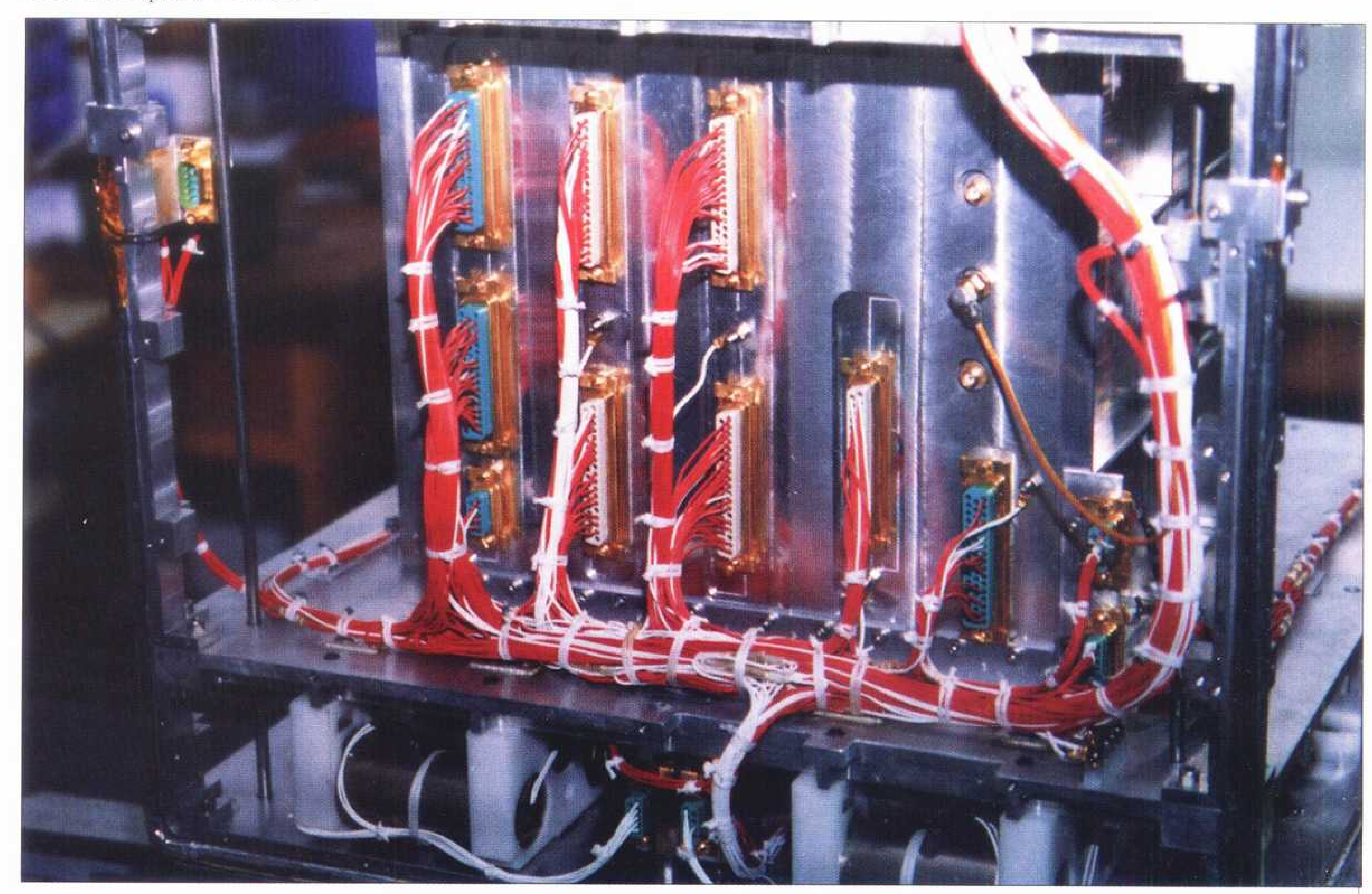


Figura 5. Vista de la caja de la electrónica *embarcada y detalle del cableado. (Foto: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.)*

tos principales que la componen, tal como se indica en la figura 2, son las bandejas, las barras de separación y los paneles de cierre laterales.

La bandeja A está situada en la parte inferior del satélite y sirve de unión al sistema de separación, por lo que su diseño está condicionado por la forma de éste, y sobre la misma se alojan las baterías que forman parte del subsistema de generación y gestión de energía. La bandeja A es una placa cuadrada de 425 mm de lado y 5 mm de espesor, y para darle rigidez se ha mecanizado con nervios de 10 mm de altura y 5 mm de ancho. Estos nervios adoptan una disposición radial para facilitar la unión al sistema de separación. La cara exterior de esta bandeja está recubierta por una manta térmica multicapa que la aísla térmicamente del exterior.

Las bandejas B, C y D son también de forma cuadrada, de 425 mm de lado, pero de 6 mm de espesor y con nervios de 9 mm de altura y 5 de ancho mecanizados en su parte inferior siguiendo una disposición rectangular. La bandeja B sirve de soporte a la caja de la electrónica, sobre la bandeja C se aloja la carga útil de puentes líquidos, además de los giróscopos y los magnetómetros y la bandeja D, que es el elemento estructural de cierre del satélite en su parte superior, sirve de soporte a la antena de comunicaciones y al conector para las comprobaciones de funcionamiento durante el proceso de integración. La cara exterior de esta última bandeja está recubierta por una manta térmica multicapa. Las esquinas de todas las bandejas, así como el perímetro de las bandejas A y D, están rebajadas para alojar a los magnetopares (figura 3).

Los elementos separadores sirven para la unión de las bandejas entre sí y son barras de sección en L con la longitud apropiada en cada caso. Los paneles de cierre lateral, que se atornillan a los laterales de las bandejas y de los separadores, y sobre los que se mon-

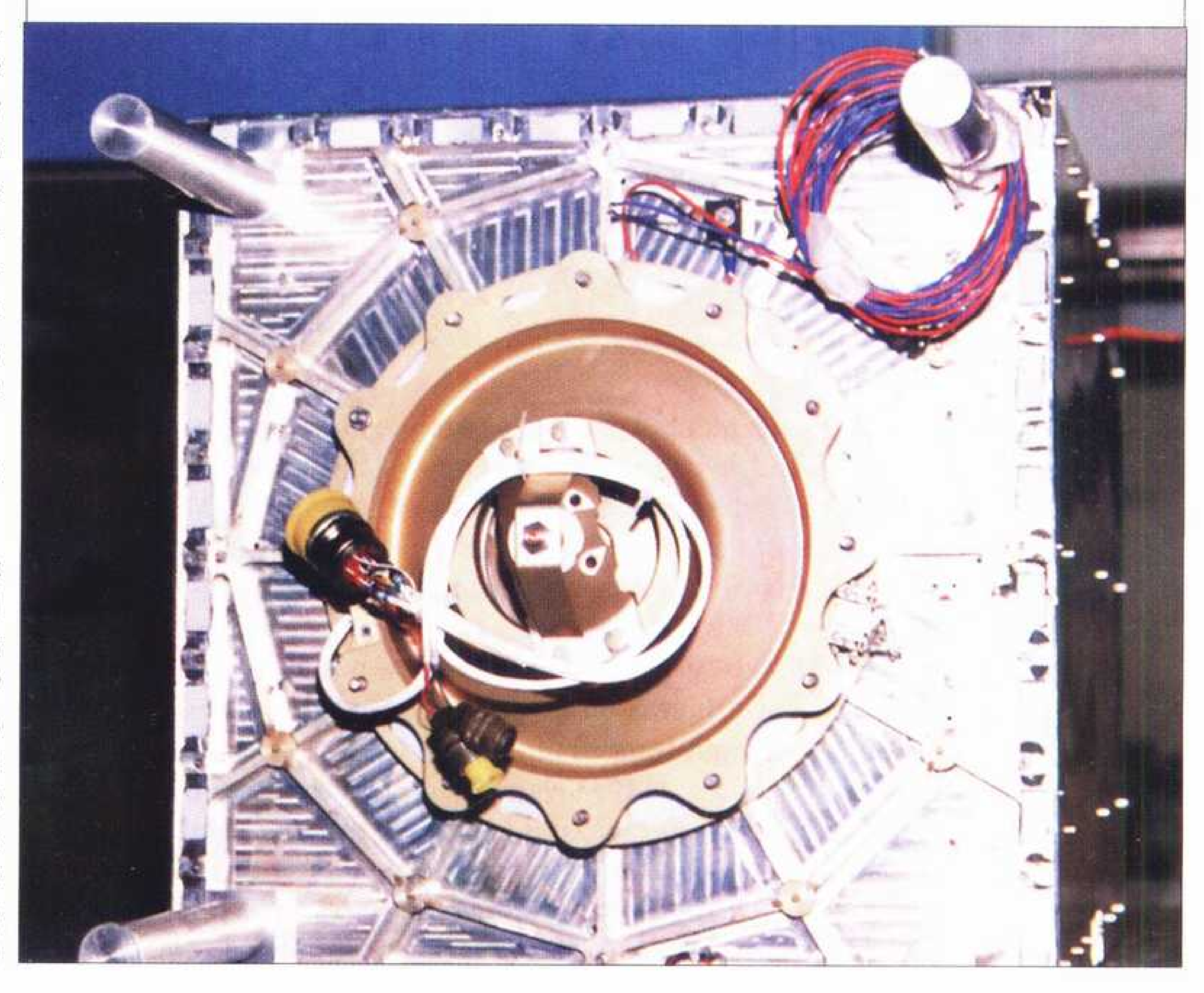


Figura 6. Vista de la bandeja inferior del UPM-Sat 1 *con el sistema de separación para carga secundarias instaladas en la plataforma ASAP de Ariane 4-40. En esta fotografía la cara exterior de la bandeja todavía no está recubierta por la manta aislante multicapa correspondiente por lo que se pueden apreciar los detalles del mecanizado de la bandeja. (Foto: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.)*

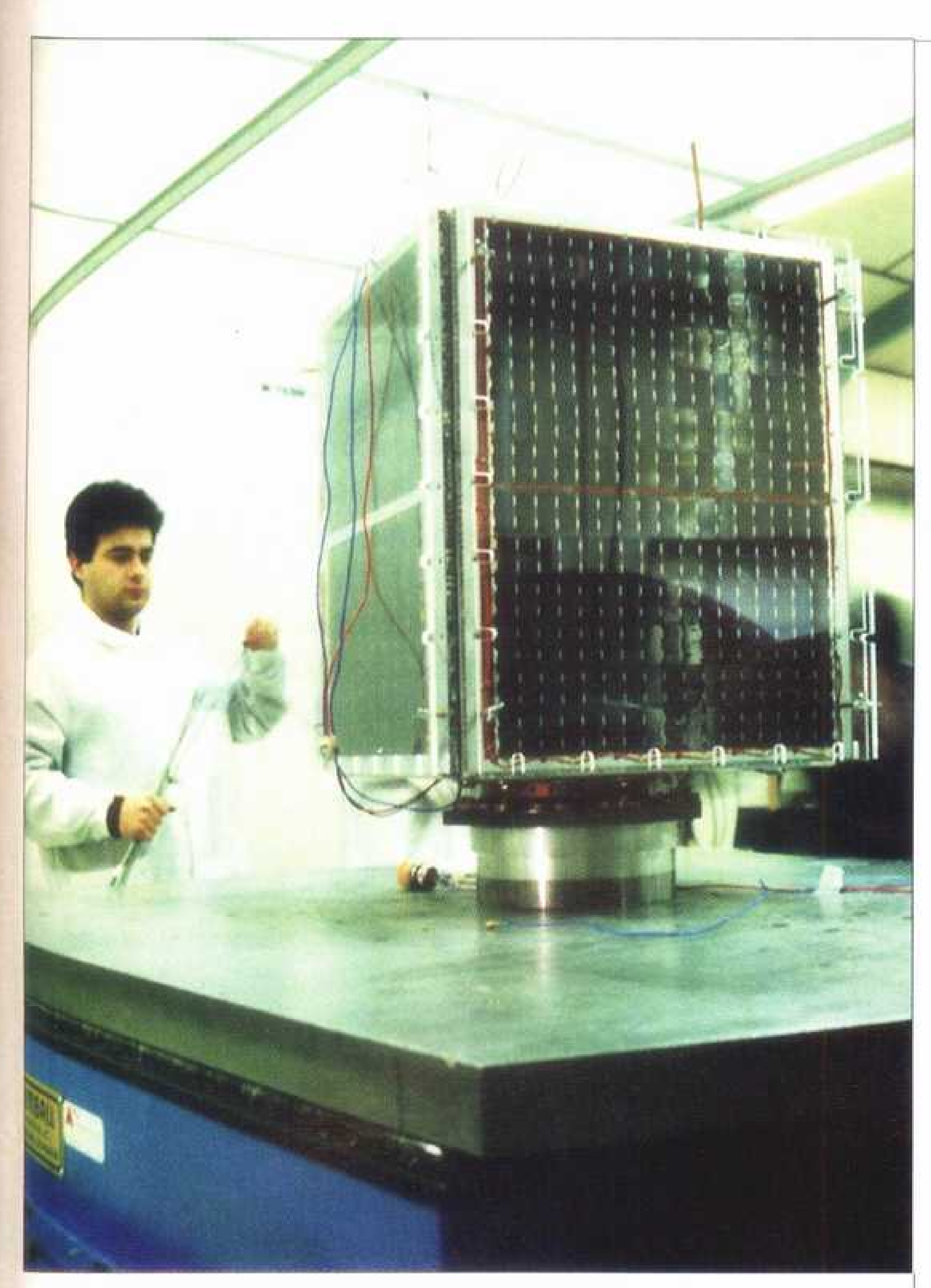


Figura 7. ***El satélite*** UPM-*Sat 1 durante los ensayos de vibración en las instalaciones del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial* (INTA). *(Foto: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.)*

tan los sustratos de los paneles solares, son chapas rectangulares de aluminio de 1 mm de espesor. Los sustratos de los paneles solares son de tipo «sandwich» y están formados por dos chapas de aluminio de 0,5 mm de espesor y una matriz de panel de abeja, también de aluminio, de 8 mm de espesor, de modo que el espesor total de los sustratos es de 9 mm.

El subsistema de protección térmica tiene como finalidad mantener las temperaturas de la estructura y de los equipos embarcados dentro de sus intervalos nominales y óptimos de funcionamiento. Para el diseño de este subsistema se tuvieron en cuenta tanto las propiedades ópticas de las superficies como las de las uniones entre los diversos elementos y componentes del satélite, y el uso de elementos pasivos de protección térmica. El interior del satélite está térmicamente aislado de los paneles de cierre lateral, para lo cual las superficies interiores del satélite están tratadas de modo que el acabado es el correspondiente a aluminio de baja emisividad. Respecto a las superficies exteriores, las que no soportan paneles solares, es decir las caras superior e inferior del satélite, están cubiertas por mantas térmicas multicapa, tal como se aprecia en la figura 4, formadas por siete capas de kapton aluminizado con separadores de fibra de vidrio. Además de todo lo anterior, en operación el satélite gira alrededor de su eje longitudinal con el fin de uniformizar la temperatura de los paneles solares.

En el UPM-Sat 1 se utiliza un modo de control de actitud extremadamente sencillo, y barato, acorde con las especificaciones del proyecto. Para variar la orientación del satélite respecto a un cierto sistema de referencia y para comunicarle el giro necesario por razones de control térmico el satélite va provisto de magnetopares cuya interacción con el campo magnético terrestre produce los efectos deseados. El subsistema de control de actitud consta de sensores, actuadores y lógica de control. Los sensores son dos magnetómetros triaxiales y tres giróscopos, mientras que los actuadores son tres magnetopares formados, cada uno, por dos bobinas de sección triangular y forma rectangular situadas en las aristas de caras opuestas del satélite.

El subsistema de gestión de datos se encarga de registrar los datos generados a bordo, procesarlos, almacenarlos, gobernar el modem y efectuar el control de todos los demás subsistemas activos de acuerdo con el programa incluido en las memorias y con los comandos enviados desde tierra. Los elementos principales de este subsistema son el módulo de adquisición de datos y control, el ordenador, los sensores internos y la interfase con el subsistema de comunicaciones (figura 5).

El módulo de adquisición de datos y control tiene 54 entradas analógicas y 3 digitales, 4 salidas analógicas y 19 digitales, todas ellas relacionadas con las medidas y controles del experimento de puentes líquidos, del subsistema de control de actitud, del subsistema de potencia, así como con las medidas de temperaturas y las comunicaciones con el modem. El módulo de sensores internos recibe 3 señales de temperatura y 2 de tensión de alimentación analógica y la interfase recibe las señales digitales de recepción de datos y comandos y la de transmisión.

En el subsistema de adquisición, tratamiento y control de datos se ha utilizado un procesador 80C31 que funciona a 7 Mhz. Este subsistema tiene 256 kbytes de memoria estática (SRAM) y 64 kbytes EEPROM para los programas; tiene, además, reloj de vigilancia, 64 canales de conversión analógica a digital, de 14 bits de resolución, 24 salidas y 8 entradas digitales, y 4 canales de conversión digital a analógica. Las comunicaciones con el modem son asíncronas a 9.600 bps.

El programa informático embarcado, cuya arquitectura es similar a una de tiempo real, dispone de un diario de actividades que detalla cada una de las acciones que se deben realizar durante la operación del satélite. Las funciones principales que realiza este programa son:



Figura 8. Ensayo de separación del satélite UPM-***Sat 1.*** *Este ensayo se realizó en los locales de la Universidad Politécnica de Madrid* (E.T.S.I. *Aeronáuticos) con el apoyo técnico de* CASA/*División Espacio. (Foto: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.)*

TABLA 1. CRONOLOGÍA E HITOS EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO UPM-SAT 1

1991	**enero**	• Definición del experimento sobre puentes líquidos. Preparación de la propuesta de desarrollo de un pequeño satélite.
	mayo	• Firma del acuerdo de cooperación entre la Comunidad Autónoma de Madrid, la Fundación Caja de Madrid y la UPM. • Comienzo del diseño preliminar.
1992	**marzo**	• Finalización del diseño preliminar. Comienzo del diseño detallado.
	abril	• Estudio de las oportunidades de lanzamiento.
	julio	• Comienzo de la fabricación de la estructura.
	septiembre	• Inicio de las negociaciones para la firma del contrato de lanzamiento. Visita a Arianespace, en Evry (Francia).
	diciembre	• Firma del contrato de lanzamiento.
1993	**mayo**	• Revisión del diseño crítico.
	junio	• Ensayos estructurales preliminares.
	julio	• Comienzo de adquisiciones para el modelo de vuelo. • Acuerdo con DASA-ESTEC y con FIAR-ESTEC para el uso del satélite como plataforma de demostración tecnológica en órbita. • Comienzo del desarrollo del simulador del satélite.
	septiembre	• Construcción de la cámara limpia para la integración del UPM-Sat 1.
1994	**marzo**	• Ensayos de calificación (mecánicos). 1ª fase.
	abril	• Visado del proyecto UPM-Sat 1 por el Colegio Oficial de Ingenieros Aeronáuticos de España.
	mayo	• Ensayos de calificación (mecánicos) 2ª fase. • Ensayos de compatibilidad geométrica . • Reunión de coordinación con Arianespace. • Ensayos de calificación (térmicos).
	julio	• Preparación del modelo de ingeniería.
	septiembre	• Integración del modelo de vuelo.
	noviembre	• Ensayo de separación.
	diciembre	• Ensayo de choque (aceptación para vuelo). • Ensayo de vibración (aceptación para vuelo).
1995	**enero**	• Ensayo de propiedades másicas (aceptación para vuelo). • Ensayo de vacío térmico (aceptación para vuelo). • Aceptación por Arianespace para vuelo en Ariane 4-ASAP.
	junio	• Campaña de lanzamiento
	julio	• Lanzamiento e inyección en órbita. • Comienzo de las operaciones desde la estación de tierra.

• Arranque, reinicialización y apagado ordenado cuando se detectan anomalías en el sistema de gestión de energía.

• Vigilancia del comportamiento de los subsistemas (equipos, memorias).

• Control de experimentos y calibraciones.

• Recogida de datos del estado interno del satélite y de navegación y recopilación del estado y configuración del satélite.

• Control de las comunicaciones con la estación de tierra y registro de los últimos contactos realizados.

• Soporte de los modos de funcionamiento (nominal, consumo reducido, contacto perdido) y respuesta automática ante cierto tipo de incidencias que pudieran ocurrir.

Por su parte, el subsistema de comunicaciones consta básicamente de una antena tipo dipolo de cuarto de onda cuasi-omnidireccional, fabricada en aleación de cobre-berilio, montada sobre una pieza de material aislante que se acopla a la bandeja superior, un sistema de modulación/demodulación formado por un transmisor, un receptor, un conmutador de antena y un modem. Para las comunicaciones el UPM-Sat 1 dispone de un canal UHF (en la banda de 400 MHz) con una potencia de salida de 10 W en un ancho de banda de 200 kHz.

El modem transforma los datos enviados por el ordenador, o los procedentes del receptor, empleando modulación de mínima desviación de fase (MSK, *Minimum Shift Keying*), a la vez que se ocupa de la operación del conmutador de antena.

En el subsistema de gestión de energía se pueden identificar tres grupos de elementos, responsables de la generación, de la acumulación y de la gestión de la energía eléctrica. La energía se genera en los cuatro paneles solares situados en las caras laterales del satélite. Los paneles son de forma rectangular (425 mm × 530 mm) y son capaces cada uno de ellos de proporcionar una potencia de 30 W al inicio de la misión. El número total de células de los cuatro paneles es de 696 y la potencia media suministrada a lo largo de una órbita es de 20 W. El funcionamiento en los eclipses y los excesos de demanda sobre la capacidad de los paneles solares se asegura mediante dos baterías que suministran cada una 6 Ah. Estas baterías acumulan la energía generada por los paneles solares durante la parte iluminada de la órbita y están formadas, cada una, por 14 células de níquel cadmio. Por razones de coste las baterías empleadas en el UPM-Sat 1 son baterías comerciales, sin calificación espacial en origen, que han sido calificadas para vuelo según un procedimiento propio desarrollado en la Universidad Politécnica de Madrid y aceptado por la compañía lanzadora Arianespace.

El subsistema de separación, denominado 5SS ASAP (5 Standard Separation System for Ariane Structure for Auxiliary Payload, figura 6), ha sido fabricado para Arianespace por Dassault Aviation. El subsistema de separación se acopla con el UPM-Sat 1 a través de una superficie plana de forma circular, lo que ha condicionado el diseño geométrico de la bandeja inferior del satélite. El satélite tiene dos microinterruptores instalados en la cara exterior de la bandeja inferior. Estos microinterruptores permanecieron abiertos mientras el satélite estuvo en el lanzador y se cerraron en el momento de la separación, generándose una señal de encendido que activó los diversos subsistemas una vez producida la inyección en órbita. El sistema de separación lleva también un interruptor, que se abre en el momento de la separación, cuya función es confirmar al lanzador el estado de separación del satélite, y una conexión eléctrica a través de la cual se realiza la carga de goteo de las baterías durante el periodo de preparación del lanzamiento.

Asegurar que el satélite no suponga riesgo alguno para terceros, ni para el lanzador ni para los otros satélites que le acompañan en el lanzamiento

La carga útil de puentes líquidos del UPM-Sat 1 es un módulo presurizado que requiere de la plataforma no sólo la condición de gravedad reducida, sino también servicios esenciales tales como el suministro de energía y señales de activación, y a la que devuelve señales analógicas y digitales que describen el estado del experimento. Este módulo ha servido además de base para la realización, casi en paralelo, de otro análogo, denominado CPLM (Comportamiento de Puentes Líquidos en Microgravedad), que es una de las tres cargas útiles de la plataforma MINISAT 01 desarrollada por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).

El módulo de puentes líquidos consta de los siguientes elementos: célula del puente líquido, módulo de control y medida de la posición del puente, módulo de medida de deformaciones, equi-

po de acelerometría, módulo de estímulos mecánicos, y sensores de presión y temperatura, a los que hay que añadir la tarjeta analógica para el tratamiento de las señales y el contenedor presurizado que encierra en su interior a los diversos componentes. Para medir la deformación del puente líquido el equipo tiene 12 captadores ópticos que se agrupan en dos series de 6 que se activan sucesivamente.

Una actividad fundamental en todo proyecto espacial está relacionada con los ensayos y pruebas a los que hay que someter al vehículo que se pretende poner en órbita, cuya finalidad es asegurar el correcto funcionamiento del satélite en las severas condiciones de presión, radiación y temperatura que impone el medio espacial y, por otra parte, asegurar que el satélite no suponga riesgo alguno para terceros, ni para el lanzador ni para los otros satélites que le acompañan en el lanzamiento.

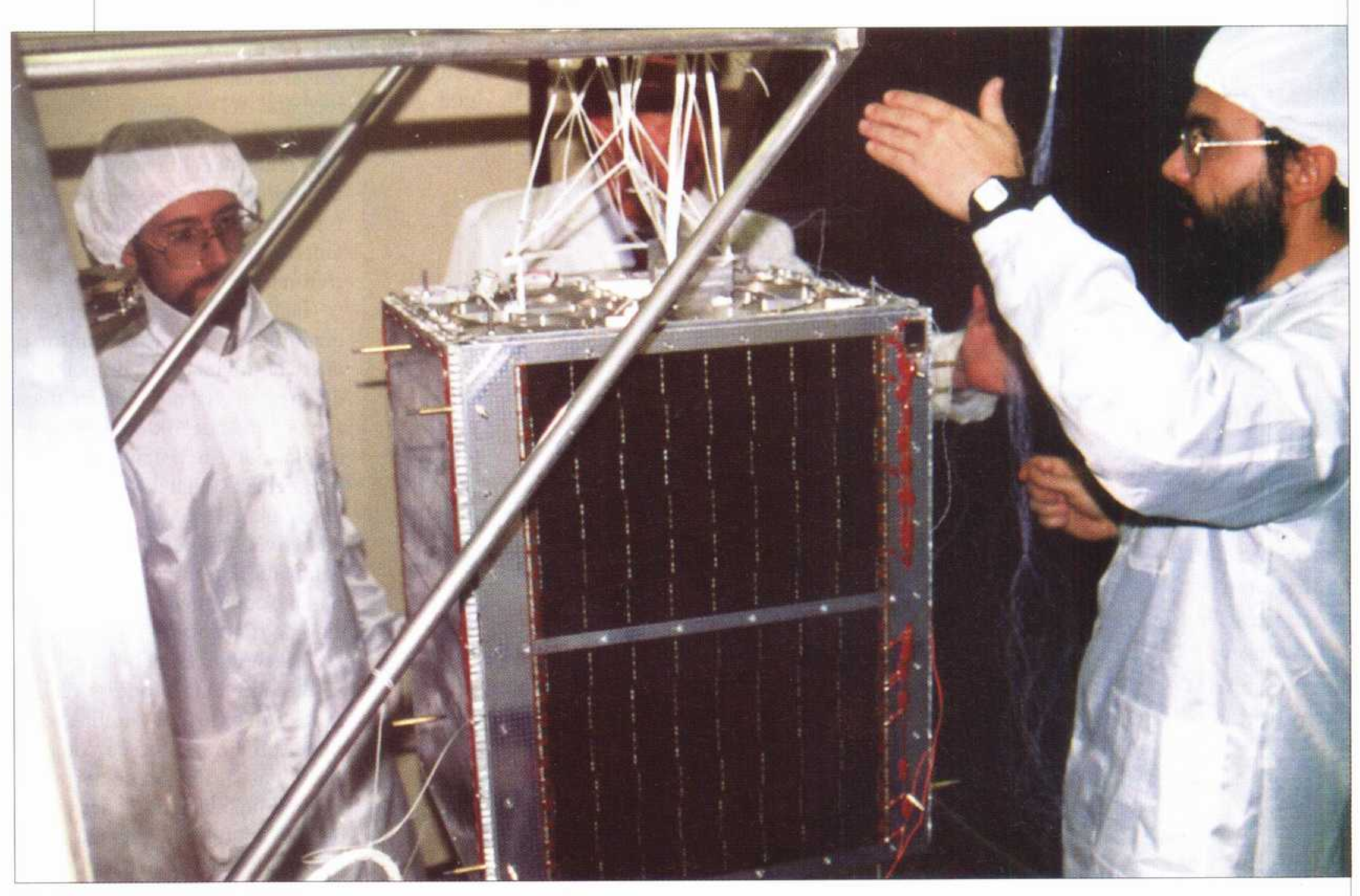


Figura 9. **El satélite** *durante los ensayos térmicos y de vacío. (Foto: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.)*

En el plan de ensayos previos al lanzamiento del UPM-Sat 1 se contemplaron diversos tipos de pruebas que afectaron prácticamente a todos los subsistemas del satélite, primero individualmente y luego considerando al satélite como un todo (figuras 7, 8 y 9). Parte de estos ensayos pudieron llevarse a cabo en la Universidad Politécnica de Madrid, utilizando instalaciones propias o cedidas por otras instituciones, pero el grueso de los ensayos requeridos hubo de realizarse en las instalaciones del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y de Contrucciones Aeronáuticas (CASA) División Espacio. De un modo general, los ensayos realizados a lo largo del desarrollo del UPM-Sat 1 pertenecen a las siguientes categorías.

Ensayos de desarrollo, que se realizan sobre prototipos o equipos y cuyo objetivo es comprobar conceptos, completar algunos aspectos del diseño (medida de propiedades, etc.), puesta a punto de equipos de medida, etc.

Ensayos de verificación, para los que se utilizan modelos de ingeniería y equipos de vuelo, con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de los equipos y de las soluciones adoptadas.

Ensayos de calificación, para los que se emplea el modelo de calificación, y que tienen como objetivo comprobar la integridad de dicho modelo frente a las solicitaciones establecidas por Arianespace.

Ensayos de aceptación para transporte al centro de lanzamiento, con los que se pretende comprobar la integridad y el correcto funcionamiento del modelo de vuelo frente a las solicitaciones establecidas por Arianespace, antes de ser enviado al centro de lanzamiento.

El último lugar lo ocupan los ensayos de aceptación para lanzamiento, mediante los cuales se comprueba el correcto funcionamiento del modelo de vuelo después de la integración final en el centro de lanzamiento, antes de ser montado en el adaptador del lanzador.

Un lanzamiento sin problemas. Las diversas fases del lanzamiento se cumplieron según la secuencia nominal

Finalizada la etapa de integración y ensayos, una vez obtenida la calificación de «apto para vuelo», el satélite, convenientemente embalado, fue enviado a la Guayana Francesa para su integración en el lanzador. El satélite llegó a la base de lanzamiento a primeros de junio de 1995, acompañado de un equipo técnico formado por cuatro personas, responsables de la campaña de lanzamiento.

Siguiendo el procedimiento habitual, la campaña de lanzamiento del satélite UPM-Sat 1 con el sistema Ariane 4 se dividió en dos fases, denominadas Operaciones del Satélite y Operaciones Combinadas, respectivamente. La primera fase incluyó las operaciones del satélite realizadas desde la llegada del satélite y el equipo de soporte al aeropuerto de Rochambeau en la Guayana, hasta el montaje en la plataforma ASAP de adaptación al lanzador Ariane 4 (figura 10), y se prolongó desde el 11 (día D-21) al 23 (día D-13) de junio. La

segunda fase comprendió desde el final de la primera (formalmente desde la aceptación para lanzamiento de los pasajeros secundarios por parte del pasajero principal) hasta el lanzamiento. En esta fase intervinieron conjuntamente los diferentes pasajeros implicados en el vuelo V75 (Helios, Cerise y UPM-Sat 1), y tuvo lugar entre el 26 de junio (día D-10) y el 7 de julio (día D-0).

El lanzamiento se desarrolló sin problemas, aunque estuvo a punto de ser suspendido a última hora pues poco antes de la hora de lanzamiento llovía torrencialmente en la región.

Después del encendido de los motores del Ariane a la hora estipulada, las diversas fases del lanzamiento se fueron cumpliendo según la secuencia nominal, de modo que unos 20 minutos después del despegue tuvo lugar la separación del satélite principal Helios, y 40 segundos después la de los pequeños satélites Cerise y UPM-Sat 1.

En ese instante finalizó la campaña de lanzamiento y dio comienzo la fase de operación del satélite, ahora bajo la responsabilidad de la estación de tierra situada en las proximidades de Madrid.

La operación del satélite ha estado centrada principalmente en la obtención de información sobre el funcionamiento de la plataforma y los paneles solares experimentales

Las comunicaciones con el UPM-Sat 1 se llevan a cabo desde la estación de seguimiento situada, actualmente, en el municipio de Soto del Real, unos 40 km al norte de Madrid.

La estación de tierra del UPM-Sat 1 consta de las unidades que a continuación se analizan.

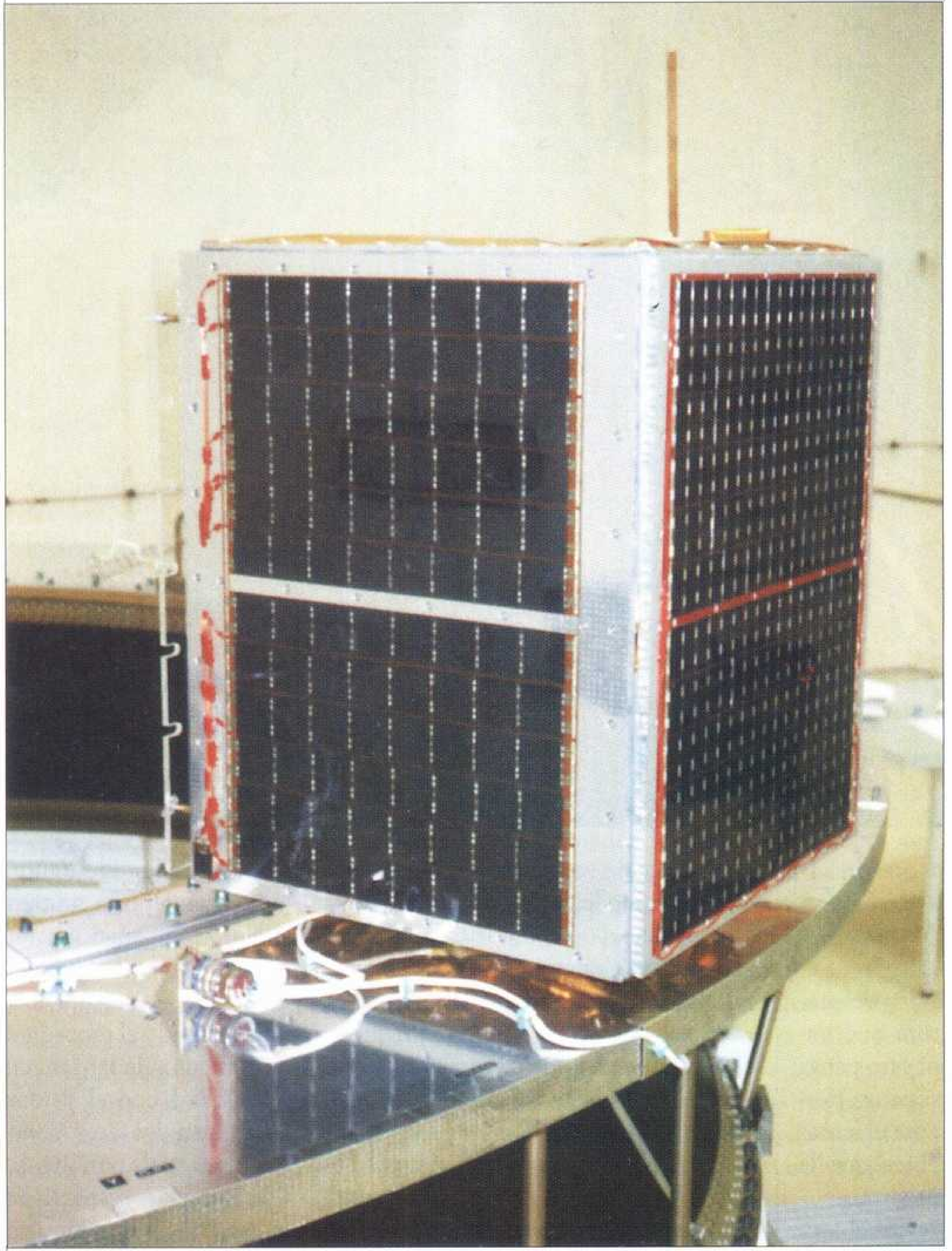


Figura 10. El satélite UPM-Sat 1 montado sobre la plataforma ASAP de Ariane 4-40 pocos días antes del lanzamiento. (Foto: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.)

Una antena direccional con +10 dB de ganancia, que está montada en el eje de salida de un rotor de seguimiento. El sistema de seguimiento del satélite, consta de un ordenador de seguimiento que dispone de un programa informático que, a partir de los parámetros de la órbita del satélite, genera las salidas de azimut y elevación que son enviadas al controlador del rotor que, a su vez, se encarga de que el rotor, de dos ejes, se posicione en la orientación requerida.

En el sistema de comunicaciones se pueden identificar el ordenador de comunicaciones, que entre otras funciones es el terminal del sistema de comunicaciones con el satélite y por tanto envía información al satélite y la recibe a través de un modem, similar al modem embarcado, que transforma las señales recibidas del ordenador de acuerdo con la modulación MSK para enviarlas al transmisor y realiza la operación inversa con las señales procedentes del receptor. El modem controla, además, el conmutador de antena, posicionándolo en transmisión o recepción.

También forma parte del sistema de comunicaciones el transmisor de frecuencia modulada, que recibe la señal del modem, la modula en frecuencia (en la banda de 400 MHz) y la envía al amplificador de potencia, y el receptor, que recibe la señal de radiofrecuencia, la demodula en frecuencia (banda ancha) y la envía al modem. La instalación se completa con el conmutador de antena, que comunica la antena con la sección de transmisión o recepción, según las órdenes del modem.

Las actividades que se realizan durante un paso del satélite son como sigue: previo al paso se comprueba el estado de la estación de tierra, se revisa el programa de actividades y el registro de operaciones y se prepara la interfase de usuario seleccionada; durante el paso se conectan las comunicaciones bidireccionales, se recogen los datos sobre el estado de la plataforma y de las cargas útiles, se envían los comandos estipulados y, al final, se desconectan las comunicaciones bidireccionales. Después del paso se revisan las operaciones con el director de operaciones, se cumplimenta el registro de operaciones, donde se consigna el estado de los equipos y las actividades realizadas, y se configura la estación de tierra para siguientes pasos.

El UPM-Sat 1 ha estado funcionando satisfactoriamente en órbita durante 213 días, hasta que ha dejado de transmitir por las causas que se detallan posteriormente. Durante este tiempo el UPM-Sat 1 ha demostrado ser un satélite robusto capaz de superar las incidencias

ocurridas, unas relacionadas con la estación de tierra y otras debidas al propio satélite.

Respecto a la estación, además de diversos traslados hasta su ubicación definitiva en Soto del Real, el incidente más grave tuvo lugar el 1 de agosto de 1995, cuando se partió el cable de la antena al quedar enganchado en el rotor de la misma, lo que dañó el amplificador del transmisor de tierra y dejó a la estación sin capacidad de transmisión. La eventualidad de que el satélite tuviera que sobrevivir sin recibir órdenes desde tierra estaba prevista en la secuencia nominal de operación y así, el satélite entró en modo radiofaro, transmitiendo periódicamente una señal de identificación. Este modo se activó el 14 de agosto, y duró hasta mediados de octubre, cuando la estación volvió a estar totalmente operativa.

Respecto a las incidencias relacionadas con el propio satélite, se ha detectado una anomalía en el programa informático embarcado que bajo ciertas circunstancias ha dado lugar a un funcionamiento anómalo del transmisor; esta situación se ha producido cuatro veces y no ha implicado riesgo para el satélite, pues el UPM-Sat 1 es capaz de salir autónomamente de la mencionada situación, como así ha sido. Otra incidencia ocurrida está relacionada con el subsistema de energía y ha demostrado ser más grave; como ya se ha dicho antes, por razones presupuestarias el UPM-Sat 1 lleva baterías comerciales sin calificación espacial. Los datos medidos en órbita indican que la temperatura de una de las baterías no ha variado prácticamente desde la puesta en órbita, manteniéndose entre 0 °C y 10 °C, mientras que la otra muestra variaciones de temperatura muy grandes, de hasta 50 °C, que indican un mal funcionamiento que ha sido, probablemente, la causa del fallo en las comunicaciones antes apuntado.

Durante los primeros siete meses en órbita, a pesar de lo precario del sistema de comunicaciones pues sólo se disponía de una estación de tierra, se han podido realizar casi todas las operaciones previstas en la misión: se han ejecutado con éxito diversos comandos para variar la actitud del satélite, activando y desactivando los magnetopares para modificar la velocidad de giro del satélite, también se ha modificado desde tierra el «software» embarcado en dos ocasiones y se ha verificado la viabilidad de las comunicaciones de mensajería, aunque limitadamente, pues sólo existe, como se ha dicho, una estación de tierra. No se ha podido realizar completamente el experimento sobre puentes líquidos debido al riesgo que implicaba para el sistema de potencia, pues requería alimentar motores eléctricos. La operación del satélite ha estado centrada principalmente en la obtención de información sobre el funcionamiento de la plataforma y los paneles solares experimentales con el fin de obtener la mayor cantidad de información sobre el funcionamiento en órbita de los diversos subsistemas y comprobar la bondad del diseño y de los modelos utilizados para el mismo: en el UPM-Sat 1 se miden más de 30 parámetros internos cada cinco minutos y las lecturas de los magnetómetros se registran cuatro veces por segundo. Hay que decir que los paneles solares experimentales proporcionados por la Agencia Europea del Espacio han funcionando satisfactoriamente y que se ha informando puntualmente a dicha Agencia de los resultados medidos en órbita.

En resumen, desde el pasado mes de julio España cuenta con cuatro objetos en órbita alrededor de nuestro planeta, el primero, el satélite INTASAT, puesto en órbita en la década de los setenta, los dos Hispasat, en órbita geoestacionaria desde principios de los noventa, y el último en llegar, el UPM-Sat 1, un modesto exponente de la capacidad tecnológica del mundo universitario español, de la Universídad Politécnica de Madrid en particular, y un ejemplo de colaboración entre la universidad, las empresas y otras instituciones, tanto nacionales como internacionales en un área de conocimiento tecnológico catalogable como de muy alto valor añadido. El desarrollo del UPM-Sat 1 ha colocado a la Universidad Politécnica de Madrid en el reducido club de universidades europeas con capacidad para producir, lanzar y operar pequeños ingenios espaciales, con un primer satélite que es también el primer paso hacia metas tecnológicamente más ambiciosas.

Para finalizar, hay que decir que el programa de satélites de la UPM tiene su continuación en el proyecto UPM-Sat 2, misión MATIAS (Mediciones Atmosféricas, Telecomunicaciones, Ingeniería y Aplicaciones de los Satélites). Este satélite, financiado parcialmente por el Programa Nacional de Investigación Espacial, dentro del Plan Nacional de I+D (CICYT), comparte los objetivos generales, educativos, tecnológicos y científicos, del programa UPM-Sat 1. MATIAS llevará una carga útil desarrollada por el Instituto de Astrofísica de Andalucía y servirá también de plataforma para demostración tecnológica en órbita de desarrollos de empresas nacionales y de la Agencia Espacial Europea, y será puesto en órbita a finales de esta década.

Á.S. y J.M. ■

EL ENCAJE DE BOLILLOS DEL CONTROL AÉREO

Stéphane Chatty

¿Cómo realizar cambios en los instrumentos del tráfico aéreo sin correr riesgos?

STÉPHANE CHATTY es ingeniero de la aviación civil francesa y doctor en informática. Dirige un equipo de investigación en el Centro de estudios de la navegación aérea (CENA) de la Dirección general de la aviación civil (DGAC) en Toulouse. Correo electrónico: chatty@dgac.fr

La ecuación del control aéreo se enuncia como una paradoja: a pesar de su buen funcionamiento, el sistema actual debe cambiar. Los equipos de los controladores pronto van a quedar obsoletos y habrá que regular un tráfico en crecimiento constante. Pero el saber de los hombres es insustituible, sus capacidades no son extensibles y los efectivos no pueden aumentar a la medida del tráfico... Pocas veces la elaboración de nuevos instrumentos habrá planteado problemas tan agudos de relación hombre-máquina.

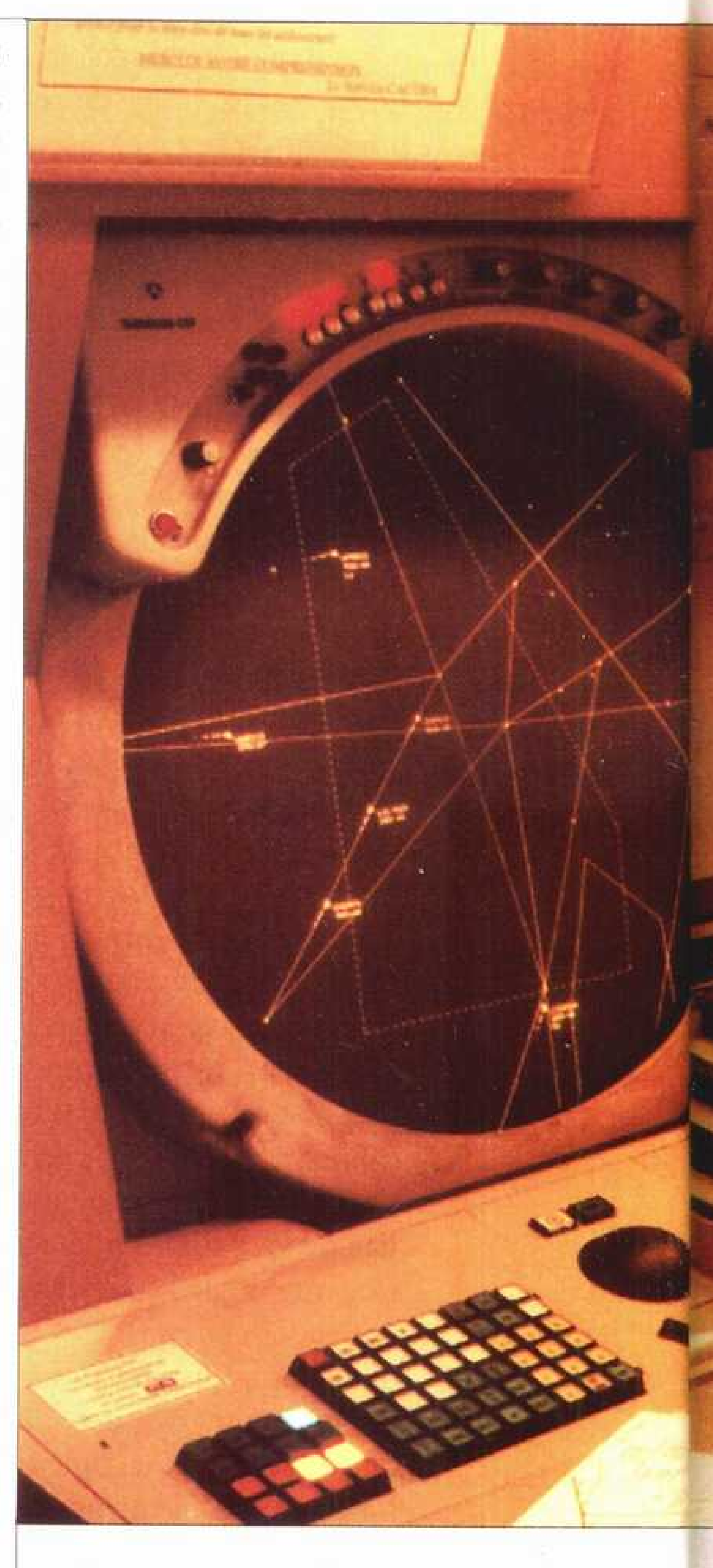
Son las 18h 37 y estamos en el espacio aéreo francés: «*Burdeos control de Air France 654, ¡buenos días! Estamos sobrevolando Limoges, estables en el 330*».

–*Air France 654, Burdeos, ¡buenos días! Mantened el rumbo para la separación radar.*

Acaba de establecerse un contacto entre este piloto de Air France y el centro del control en ruta de Burdeos. En tierra, el controlador radar esperaba la llamada. Un cuarto de hora antes, sentado a su lado, su colega el controlador orgánico (coordinación y planificación) tendía el brazo hacia la impresora para coger una hoja de papel, el *strip*. Esta hoja contiene informaciones deducidas del plano de vuelo entregado por el piloto antes del despegue. Al compararlas con la pantalla de radar, el controlador orgánico ha detectado un problema: el nivel 330 del vuelo AF 654 corresponde al de otro avión con el que aquél se cruzará poco después de su entrada en el sector de control. El controlador orgánico pone los *strips* de ambos aparatos el uno al lado del otro e indica el problema al controlador radar. Compete a este último gestionar la situación vigilando la pantalla y dando las instrucciones pertinentes a los pilotos.

El control aéreo es un ejemplo típico de actividad en la cual la distribución de tareas entre el hombre y la máquina es compleja y donde la ruptura del equilibrio establecido podría acarrear consecuencias desastrosas. En un momento en que la mayoría de los países occidentales modernizan sus centros de control, hay que redoblar los esfuerzos para sacar partido de las nuevas técnicas de interacción hombre-máquina sin poner en entredicho este equilibrio. Ello requiere una comprensión en profundidad de la actividad de los controladores y una reflexión coherente sobre los servicios y las interfaces que se les proponen.

Se habla a veces del control aéreo civil por los movimientos sociales que provoca, pero nunca por haber causado una colisión en vuelo. Esta simple constatación permite hacerse una idea del problema planteado a los creadores de nuevos sistemas: el progreso técnico no puede ir acompañado de una degradación de la seguridad, siquiera temporal. En tales condiciones, ¿por qué modificar las estaciones de trabajo de los controladores? Porque el material actual está llegando a su caducidad y porque el tráfico aéreo es cada vez más denso. En el espacio aéreo francés, el número de aviones controlados aumenta entre un 4 % y un 7 % anual, un crecimiento que debería acelerarse con la liberalización en curso del cielo europeo. Para gestionar más aviones, no se puede aumentar indefinidamente el número de controladores; las tareas de coordinación entre los propios controladores se volverían demasiado complejas. En consecuencia, hay que aumentar la carga de trabajo individual. No obstante, incluso con un entrenamiento muy intenso, las capacidades humanas no son indefinidamente extensibles. Es aquí donde intervienen los sistemas informáticos y donde se plantea más especialmente la cuestión de las interfaces hombre-máquina. Si las capacidades humanas son a un tiempo limitadas e insustituibles, la solución exige un mejor uso de dichas capacidades. Los programas informáticos, pues, deben simplificar las tareas. Pero no es tan fácil. Si no están bien adaptadas, unas nuevas funciones o una magnífica interfaz pueden tener el efecto exactamente opuesto al esperado e incluso contribuir a accidentes. Así se explica la prudencia con que se intenta modificar el sistema actual.



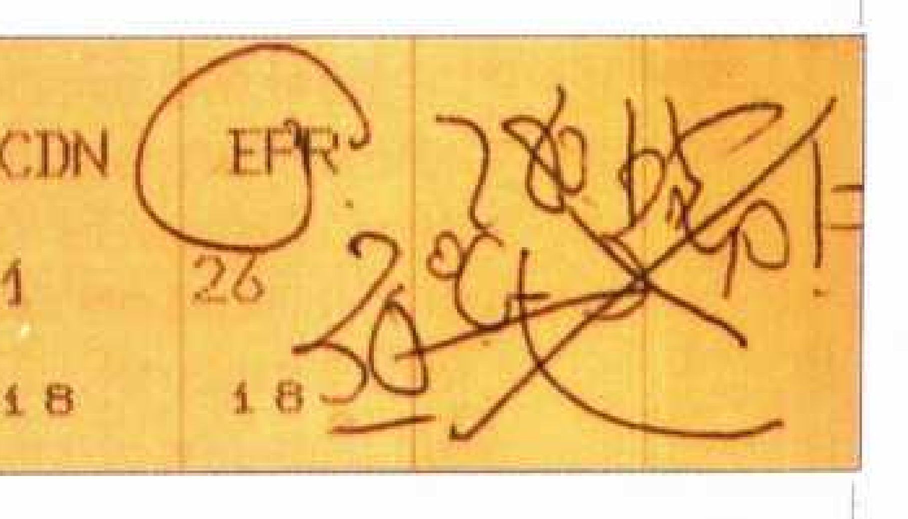
Los visitantes de los centros de control aéreo regionales se sorprenden a veces de lo rústico del material utilizado. La pantalla de radar, por ejemplo, tiene un grafismo particularmente sobrio. Esta sobriedad se explica en parte por las exigencias materiales de los años 1960 y 1970. Pero también es debida a una gran prudencia en lo tocante a las interacciones hombre-máquina. Para determinar las instrucciones que van a dar por radio a los pilotos, los controladores necesitan informaciones sobre los aviones y sus intenciones, pero también un soporte que les permita tomar notas y reflexionar. Ahora bien, el sistema francés actual se basa en la opción deliberada de limitar al máximo el papel de la informática en la presentación de las informaciones. Hay una voluntad de exigir

el menor número posible de manipulaciones a los controladores para que se puedan concentrar al máximo en los problemas a resolver. En Estados Unidos se ha optado por una solución diferente, pues los controladores utilizan constantemente un teclado para dialogar con el ordenador.

El sistema francés trata de correlacionar las informaciones de los radares y los planos de vuelo para presentarlos en la pantalla de radar e imprimir los *strips*. Los controladores clasifican una y otra vez estos *strips* para detectar los problemas y los anotan para recordar las instrucciones dadas a los pilotos. Estas lengüetas de papel hacen las veces de recordatorios e incluso de soportes de colaboración entre los controladores de un mismo sector. Cabe decir, en resumen, que los controladores interactúan más con el papel que con el sistema informático y que el papel constituye el único soporte material para su reflexión. Este sistema débilmente interactivo es muy fiable pero ofrece pocas perspectivas de evolución. A finales de los años 80 se decidió, pues, aprovechar la sustitución de los materiales, que debe producirse antes de fin de siglo, para modificarlo. El proyecto Phidias de la Dirección francesa de navegación aérea (ministerio de Transportes), lanzado en 1986, consiste en sustituir las pantallas de radar por interfaces gráficas modernas, pero también en extender su uso a la gestión de los *strips*, e incluso, algún día, a ciertos intercambios con los pilotos (véanse fotos página siguiente). Se trata de una ruptura importante con respecto al sistema actual basada en una apuesta que podría formularse así: hagamos que los controladores informen al sistema sobre sus acciones y éste devolverá el gesto en forma de ayudas al control. Siguiendo el ejemplo de la Federal Aviation Administration norteamericana, no tardó en decidirse utilizar grandes pantallas en color de alta resolución y un medio de designación en pantalla. No faltaron entonces los temas de estudio: ¿cómo utilizar el color?, ¿cómo visualizar decenas de aviones en movimiento sobre una pantalla de cuatro millones de píxels?, ¿qué lenguaje gráfico utilizar?, ¿qué medio de comunicación emplear (ratón, bola o lápiz óptico)?, ¿cómo volver a poner en marcha el sistema en caso de avería?

Tales son las cuestiones, entre otras muchas, que deben resolver los ingenieros de navegación aérea y los ergónomos que colaboran con ellos.

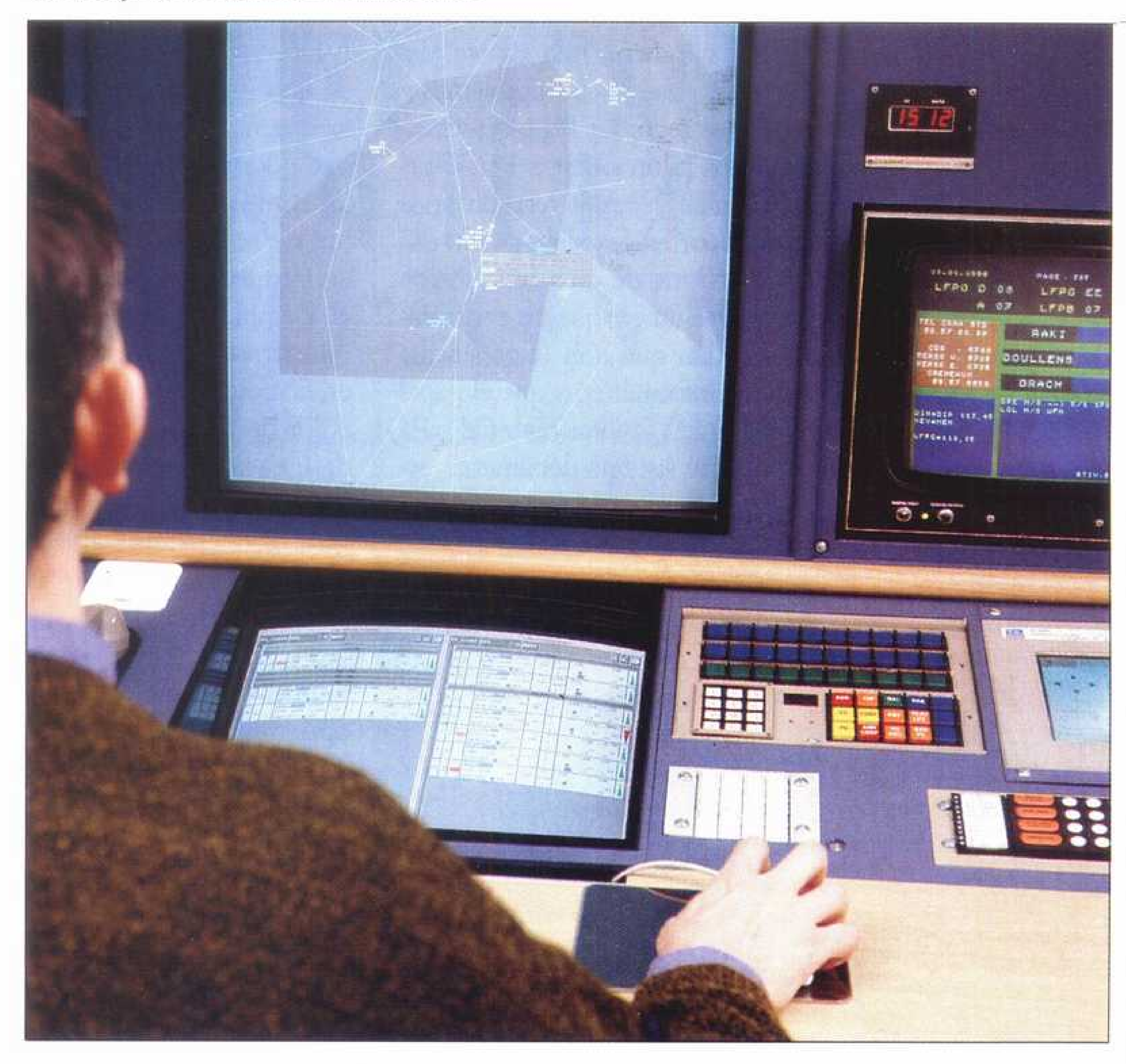




En Francia, los controladores aéreos civiles disponen actualmente de un equipo bastante simple: una pantalla radar, una radio y los «strips». Estas pequeñas cintas de papel impresas por ordenador (de las que aquí se muestra un ejemplar) contienen las informaciones del plano de vuelo seguido por cada avión. Los controladores las tienen a mano, amontonadas, y van haciendo anotaciones en ellas a medida que van intercambiando información con los pilotos que se acercan al aeropuerto. El radar de la foto superior muestra siete aviones; un controlador experimentado puede controlar hasta unos veinte. (Foto ENAC.)

El próximo sistema no debe ser demasiado perfeccionado: los controladores han de poder prescindir de él en caso de avería

El mundo aeronáutico tiene una fuerte cultura de ingenieros. No es de extrañar, pues, que los primeros problemas resueltos fueran problemas técnicos. Los franceses, seguidos de cerca por los demás países europeos, optaron por un entorno próximo a los microordenadores y a las estaciones de trabajo y aprendieron a solventar los difíciles problemas gráficos. Al mismo tiempo, se realizó una selección de técnicas de interacción: los Macintosh y Windows habían demostrado que los menús, los botones y los cuadros de diálogo podían servir perfectamente para la mayoría de las aplicaciones. En cambio, era mucho más difícil diseñar nuevas funciones e integrarlas a la interfaz y a la vez mantener un entorno de trabajo coherente y confortable. Los estudios comportaron experimentaciones semirrealistas, pero una parte importante del trabajo sólo podía empezar una vez se hubieran instalado los primeros prototipos en los centros de control. Como en el sastre, los defectos no aparecen hasta que se realizan las primeras pruebas. Hoy en día, se está retocando Phidias al tiempo que se va esta-



Prototipo de la nueva estación de trabajo Phidias: *la pantalla de radar ha sido sustituida por una interfaz gráfica manejable por medio de un ratón: los «strips» aparecen en una pantalla horizontal.*

bleciendo un consenso respecto a ciertas funciones e interfaces. Si los desarrollos informáticos prosiguen sin obstáculos, los controladores dispondrán pronto de una interfaz gráfica como instrumento de trabajo. En una segunda fase, tendrán que utilizarse los nuevos entornos de trabajo para ayudarles a gestionar un tráfico más intenso. Con este fin, es indispensable comprender los métodos de trabajo de los controladores, identificar las informaciones que utilizan verdaderamente y localizar los estrangulamientos que limitan su capacidad de tratamiento.

En el sistema actual, hay muchas cosas que sólo son tratadas en la cabeza de los controladores. Es lógico, pues, que los estrangulamientos estén ligados a sus capacidades mentales, por ejemplo la memoria. Para poner remedio a la situación, el Centro de estudios de la navegación aérea francesa (CENA) está trabajando en el proyecto ERATO, que prevé la creación de varios nuevos servicios.[1] Por ejemplo, este nuevo entorno prevé filtrar los aviones que no plantean problemas haciendo que sean menos visibles que los demás; llega incluso a modificar sutilmente el modo de trabajo de los controladores haciéndoles gestionar grupos de aviones con problemas y no aviones aislados. Ello permite reducir el número de aviones a memorizar e incluso llevar una agenda de los problemas a resolver. Los controladores pueden concentrarse en las tareas de reflexión dejando que el sistema informático asuma las tareas más mecánicas. No obstante, se han tomado precauciones para que ERATO no modifique tan radicalmente los métodos de trabajos que se vuelva indispensable. ¿Qué ocurriría entonces en caso de avería informática? Es importante que los controladores no pierdan la capacidad de gestionar solos los aviones, aunque sea el precio de una productividad reducida. Si estos inventores logran persuadir a los controladores de que ERATO les puede ayudar sin comprometer la seguridad, dicho sistema constituirá probablemente un primer paso hacia la mejora de las capacidades de control. Sin embargo, como ocurre en los atascos viarios, se descubrirán entonces otros estrangulamientos, entre los cuales la velocidad de interacción entre el hombre y la máquina. Toda persona acostumbrada a los microordenadores conoce la sensación de impaciencia que se produce cuando la mente encadena rápidamente las decisiones, pero la mano tarda en ejecutarlas. Estas lentitudes de interacción son particularmente perceptibles en el caso de menús que hay que desplegar; también requieren una atención redoblada para evitar manejos incorrectos. Los enemigos, pues, son la carga visual y el tiempo de ejecución.

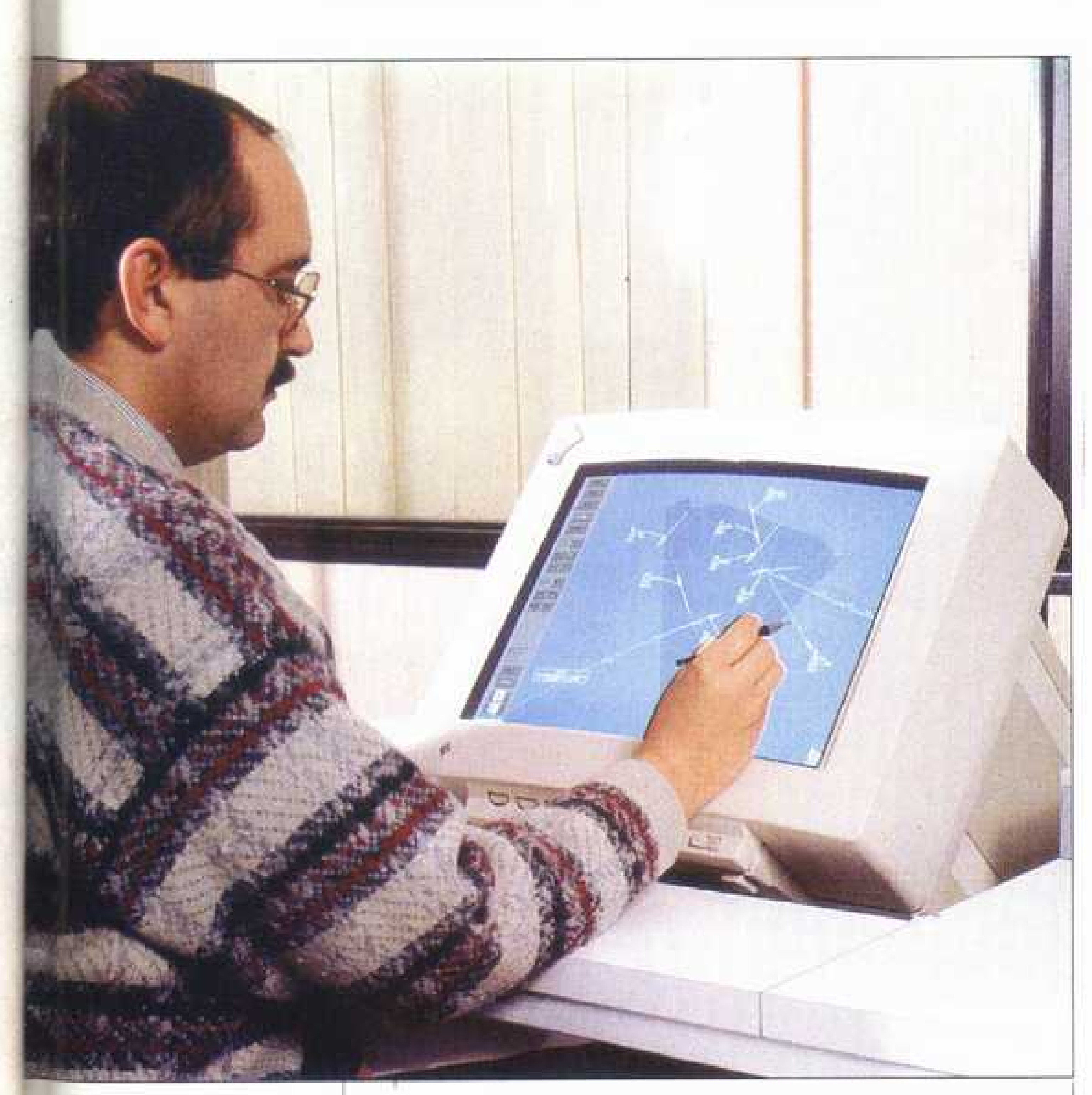
En este sentido, el ratón y los menús soportan mal la comparación con el bolígrafo y el papel actualmente utilizados por los controladores aéreos. Hay que recurrir, pues, a nuevas técnicas de interacción. El reconocimiento del habla ha suscitado grandes esperanzas; ya que los controladores hablan a través de la radio, ¿por qué no explotar sus palabras? Lamentablemente, los errores de reconocimiento son todavía demasiado numerosos para poder conciliarlos con la velocidad de ejecución y la seguridad: un controlador no puede permitirse el lujo de repetir sus frases. Últimamente, la prensa y ciertos laboratorios se han apresurado a incluir el control aéreo en la lista de aplicaciones de la realidad virtual. Pero ninguna propuesta concreta ha demostrado todavía su utilidad. Las pantallas táctiles y la interacción por pluma (*pen-based computing*) parecen mucho más prometedoras. Escribir con bolígrafo es una actividad familiar dotada de propiedades interesantes: no hay que ser muy preciso y la riqueza expresiva es muy grande. Además, la escritura es una actividad más manual que visual: la mano tiene en cierto modo una percepción y una memoria propias. Para convencerse de ello, basta ver escri-

PARCTabs
Nombre con el cual Marc Weiser, investigador de Xerox Parc, designa unos objetos electrónicos autónomos que ocupan poco espacio (de tipo «pager», agenda electrónica, etcétera.).

(1)
Marcel Leroux e Irène Gaillard, *Evaluation of advanced decision aids for enroute aire traffic controllers.* 8th International Symposium on Aviation Psychology, Ohio State University, Columbus, 1995.

(2)
S. Cépadaès y P. Lecanoet, *Un poste de travail avec reconnaissance de gestes pour le contrôle aérien*, Actas de IHM'95, Cépadaès éditions, Toulouse, 1995.

La interacción con bolígrafo, *próxima al modo de anotación manual actual, está destinada hacer evolucionar las condiciones de trabajo de los controladores. Aquí, el ontrolador indica n cambio de nivel al vuelo* AFR 3552 *mediante n trazado en una ventana abierta en la pantalla.*



bir a un controlador aéreo mientras habla por radio y mira la pantalla. Nosotros, por nuestra parte, estamos explotando la interacción por bolígrafo para el control aéreo. Se ha construido un prototipo de puesto de control que consta de una estación de trabajo cubierta por una superficie sensible transparente (véanse la fotos de esta página). Dicho material presenta una imagen radar sobre la cual los controladores, por medio de una serie de gestos simples, pueden anotar directamente las instrucciones dadas a los aviones. Por ejemplo, para anotar un cambio de nivel (*Cleared Flight Level*) basta escribir una «C» junto al avión involucrado y luego seleccionar con el bolígrafo un nuevo nivel. Sin contar con la velocidad de ejecución de los gestos, este método presenta la ventaja de poder aumentar el número de instrucciones sin tener que alargar el tiempo de manipulación. Allí donde sería necesario desplegar un menú, o incluso recurrir a submenús, basta aprender un gesto suplementario que no requiere más tiempo que los demás.

En el prototipo actual, llamado GRIGRI, unas diez instrucciones diferentes son accesibles sin nada más que realizar un simple gesto sobre la etiqueta del avión.(2) GRIGRI sirve también para experimentar con otras pistas con el fin de mejorar la interacción. Por ejemplo, utiliza sonidos para que el usuario pueda percibir cambios de contexto.

En efecto, el control aéreo es una actividad que actualmente requiere el concurso de la vista, el oído y el tacto, pero la utilización intensiva de interfaces gráficas podría concentrar la señales en el canal visual y sobrecargarlo. Esperamos, pues, lograr construir un entorno multimodal en el que la mano, la oreja y el ojo realicen cada uno su papel. Por otra parte, los entornos de trabajo tenderán a funcionar en un entorno cooperativo: los controladores deben comunicarse y colaborar permanentemente. En tales condiciones, es posible que el control aéreo tienda a largo plazo hacia un entorno de tipo «realidad aumentada» (sobre dicho concepto, véase el artículo de W. Mackay, *Mundo Científico*, nº 168). Se puede pensar, por ejemplo, en objetos activos que se manejen como *strips*, pero que funcionen como PARCtabs*. Algunas de estas vías de investigación se concretarán y favorecerán una mejora del control aéreo; otras, en cambio, serán abandonadas. ¿Topará el reconocimiento de los gestos con los mismos obstáculos que el reconocimiento del habla, que todavía no ha cumplido todas sus promesas? ¿Entrará pronto en servicio el filtrado de los aviones? ¿Utilizarán todavía las próximas versiones de Phidias el ratón y el menú? Aún no lo sabemos. Para cada propuesta que hagan los investigadores, la última palabra corresponde a la validación. Cuando entra en juego su responsabilidad, los usuarios exigen muchas garantías sobre la utilidad e inocuidad de toda nueva herramienta. La validación de un sistema interactivo es una tarea muy difícil y todavía mal comprendida. En el futuro, los investigadores tendrán que tratar de averiguar cuándo es fiable y eficaz una interfaz hombre-máquina. Está en juego la seguridad de los pasajeros, pero también lo están los mercados aeronáuticos del futuro.

S.C. ■

Para más información

■ Georges Maignan, *La contrôle de la circulation aérienne*, PUF «Que-sais-je?» nº 2.572, París, 1991.

■ André Bisseret, *Représentation et décision experte- Psychologie cognitive de la décision chez les aguilleurs du ciel*, Octarès Editions, Toulouse, 1995.

■ A. Gras, C. Moricot, S.L. Poirot-Delpech, V. Scardigli, *Face à l'automate, le pilote, le contrôleur et l'ingénieur*, Publications de la Sorbonne, París, 1994.

■ Phidias, «La révolution tranquille», número especial de *CONTRol*, revista de la Asociación profesional francesa de la circulación aérea, Mérignac, septiembre de 1992.

Dominique Lecourt

RENÉ DESCARTES, CIENTÍFICO Y FILÓSOFO

Invitación a reconsiderar la base metafísica de una obra singular

DOMINIQUE LECOURT es profesor de filosofía de la universidad Denis-Diderot Paris-VII.

Nacido el 31 de marzo de 1596, Descartes es todavía, cuatro siglos más tarde, objeto de polémica. Partidarios y adversarios, según sea su interés, optan por hacer hincapié en tal o cual aspecto de una obra ingente. Pero con ello se ignora que el propio Descartes siempre reivindicó la unidad de sus trabajos. El eco de su tentativa (fundar el pensamiento científico en una metafísica) todavía resuena...

René Descartes ha inscrito su nombre en la historia de la ciencia moderna por haber reformado profundamente las matemáticas de su tiempo, haber aportado varias rectificaciones decisivas a los conceptos fundamentales de la mecánica naciente y haber formulado una de las primeras leyes de la óptica moderna. Y, sin embargo, el mismo hombre edificó una física y una cosmología fantásticas que extraviaron el pensamiento científico durante más de medio siglo. Tal parece ser el enigma de su obra científica. Al capricho de las polémicas que sobre él se han generado, se ha visto cómo sus partidarios valoraban sus resultados positivos para mejor olvidar las aberraciones de su filosofía natural y cómo sus adversarios argumentaban a partir de estas últimas para negar, si no el valor, sí al menos la autenticidad de dichos resultados.

Los primeros no tienen en cuenta que Descartes nunca dejó de afirmar la unidad de sus trabajos; los segundos silencian el reconocimiento de que fueron objeto sus trabajos matemáticos, mecánicos y ópticos por parte los más hostiles de sus colegas: de Pascal a Newton pasando por Fermat y por su discípulo Christiaan Huygens, o más tarde, por parte de un matemático tan eminente como Leonhard Euler...

Para descubrir la clave del enigma, conviene sin duda admitir que en Descartes es imposible disociar al científico del filósofo. ¿No relacionó él mismo sus resultados más sobresalientes con la conciencia, adquirida desde su más temprana edad, de las exigencias metafísicas del trabajo científico? Podría darse el caso de que, paradójicamente,



(Anónimo, siglo XVII, museo de los Agustinos, Toulouse)

Figura 1. Una visión de largo alcance: *«Sé perfectamente que podrán transcurrir varios siglos antes de que se haya deducido de estos Principios todo lo que puede deducirse de ellos». (Prefacio a la edición francesa de los* Principia Philosophia*). (Foto Jean Dieuzaide.)*

sus aberraciones más notorias en física y cosmología fueran debidas a la doctrina que elaboró para crearlas.

Debemos esencialmente al matemático R. Descartes la invención de lo que más tarde se daría en llamar «geometría analítica»: Descartes fue el primero en establecer «la relación y conveniencia mutuas del álgebra y la geometría»...

Fue el primero en demostrar que es posible utilizar las propiedades geométricas de las curvas para, por ejemplo, «construir» las raíces comunes de las ecuaciones determinando los puntos de intersección de las correspondientes curvas; que es posible, inversamente, partir de las ecuaciones de las curvas para, por ejemplo, determinar sus puntos de intersección calculando sus raíces comunes. En un caso, se hace álgebra por medio de la geometría; en el otro, se hace geometría por medio del álgebra.

La lectura de Galileo fascinó a Descartes, lo que no le impidió considerar críticamente su método

En su *Geometría*, publicada en 1637 a modo de «ensayo» de su famoso método, es patente el valor que atribuye a este segundo proceder: «*Con el método que utilizo* —escribe— *todo cuanto cae bajo la consideración de los geómetras se reduce a un único tipo de problemas, consistente en buscar el valor de las raíces de alguna ecuación*». Al resolver con este método el problema de Papo, Descartes se jacta de haber establecido un procedimiento racional de clasificación de las curvas. Y el uso de las coordenadas que más tarde se llamarían «cartesianas» procede de los mismos trabajos.

Pero, ¿son imputables estos éxitos técnicos, como pretenden sus detractores, a la simple conjunción de elementos tomados a la geometría de los antiguos y al álgebra de los árabes? Más bien hay que atribuirlos a una ambición que Descartes nunca disimuló: la de acceder, más allá de las matemáticas concretas (o «*vulgares*») a una «*ciencia universal del orden y la medida*» que denominaba *Mathesis universalis* en sus *Reglas para la dirección del entendimiento* de 1628. Pero para concebir el proyecto en estos términos, le hacía falta liberarse en matemáticas del dominio de la lógica de Aristóteles, que basaba la clasificación de las ciencias en la distinción irreductible de los distintos «géneros» del ser. El filósofo griego escribía, por ejemplo, que no es posible «*aplicar la demostración aritmética a los accidentes de la magnitud*».

El antiguo alumno de los jesuitas del Collège de la Flèche, no ignoraba, por supuesto, que esta lógica era indisociable de la metafísica a la cual estaba incorporada...

Requerido por su amigo holandés Isaac Beeckmann, Descartes se interesó desde su juventud por el problema de la caída de los cuerpos. Cuando leyó a Galileo, expresó su admiración en estos términos: «*Galileo trata de examinar las materias físicas mediante razones matemáticas*» y «*no hay otro medio de llegar a la verdad*».

Descartes recusó, en nombre del movimiento rectilíneo, el privilegio milenario concedido al movimiento circular, considerado como el más perfecto y simple. En los *Principios de filosofía* (1644) dio el primer enunciado correcto del principio de inercia, que figura en la segunda parte de la obra como «*segunda ley de la naturaleza*»: «*Todo cuerpo que se mueve tiende a proseguir su movimiento en línea recta*». En óptica, Descartes reconoció en Johannes Kepler a su «*primer maestro*» y llegó en 1628 al enunciado de la ley de la refracción («ley de los senos») independientemente, pese a las insinuaciones de Leibniz, del físico y astrónomo Willebrord Snell, llamado Snellius, quien la había formulado dos años antes sin publicarla.

Figura 2. Sus presuposiciones metafísicas *guiaron a Descartes hacia la teoría de los torbellinos: «[...]la materia del Cielo donde se encuentran los planetas gira sin cesar como un torbellino en cuyo centro estuviera el Sol...». (Foto tdr.)*

Pero la adhesión de Descartes a la doctrina de Galileo no carecía de reservas explícitas. El matemático reprochaba a Galileo haber lastrado las materias tratadas con digresiones inútiles y explicaciones inacabadas, porque «*no las examinó por orden*» y porque «*sin haber considerado las primeras causas de la naturaleza, sólo buscó las razones de algunos efectos particulares, por lo que edificó sin fundamento*»...

La ambición le indujo a construir un *Sistema completo* basado en un número reducido de conceptos

En este campo, el proceder de Descartes se inspira en el mismo principio que en matemáticas: para progresar, conviene no sólo desmarcarse de la lógica y la física de Aristóteles sino también establecer, contra él, las verdaderas bases metafísicas del conocimiento.

Su ambición era inmensa. Quería reconstruirlo todo empezando desde el principio. Así lo prueba esta declaración: «*No quiero ser como estos pequeños artesanos que se limitan a remendar las viejas obras porque se sienten incapaces de acometer otras nuevas*».[1] Creyó haber cumplido su tarea en las *Meditaciones metafísicas* (1641). El 11 de noviembre de 1640, Descartes anunció el libro a Mersenne en los siguientes términos: «*Quiero decirle que esta poca Metafísica que le envío contiene todos los principios de mi Física*». El 28 de enero de 1641, reiteraba: «*Estas seis Meditaciones contienen todos los fundamentos de mi Física*».

Estos fundamentos encabezan el manual (los *Principios de filosofía*) con el que Descartes esperaba sustituir a los tratados aritotélicos en la enseñanza de las escuelas. El orden importaba por encima de todo: a los «*principios del conocimiento*» (primera parte) les seguían los «*principios de las cosas materiales*» (segunda parte) y luego se abordaba el «*mundo visible*». En la célebre *Carta prefacio* con que comienza esta obra, Descartes precisaba lo siguiente en lo tocante a los primeros: «*se trata de todos los principios que utilizo por lo que respecta a las cosas inmateriales o metafísicas, de los cuales deduzco muy claramente los de las cosas corporales o físicas*». Aparecía con toda claridad el «*fundamento*» que le faltaba a Galileo y sobre el cual descansaba la concepción y la práctica cartesianas de las mate-

(1) *La recherche de la vérité*, Adam et Tannery, X, 509, Vrin, 1964.

EL PROBLEMA DE PAPO

Este problema, ya citado por Papo (s. IV d.-C.) en su *Colección matemática*, había sido parcialmente tratado por Euclides y Apolonio. Su resolución completa ocupa un importante lugar en la *Geometría* de Descartes, quien la consideraba como «*una ocasión para averiguar si, con el método que utilizo, es posible llegar tan lejos como ellos*».

La formulación del problema no es simple: «*Dadas tres, cuatro o más rectas: primero, hallar un punto desde el cual se puedan trazar otras tantas rectas, una sobre cada una de las dadas, que formen con ellas ángulos dados y tales que el rectángulo contenido en dos de ellas trazadas desde el mismo punto guarde la proporción dada con el cuadrado de la tercera si no hay más que tres, o con el rectángulo de las otras dos, si hay cuatro... en segundo lugar, dado que siempre hay infinitos puntos distintos que pueden satisfacer lo exigido, se pide determinar y trazar la línea sobre la cual deben encontrarse todos*».[1]

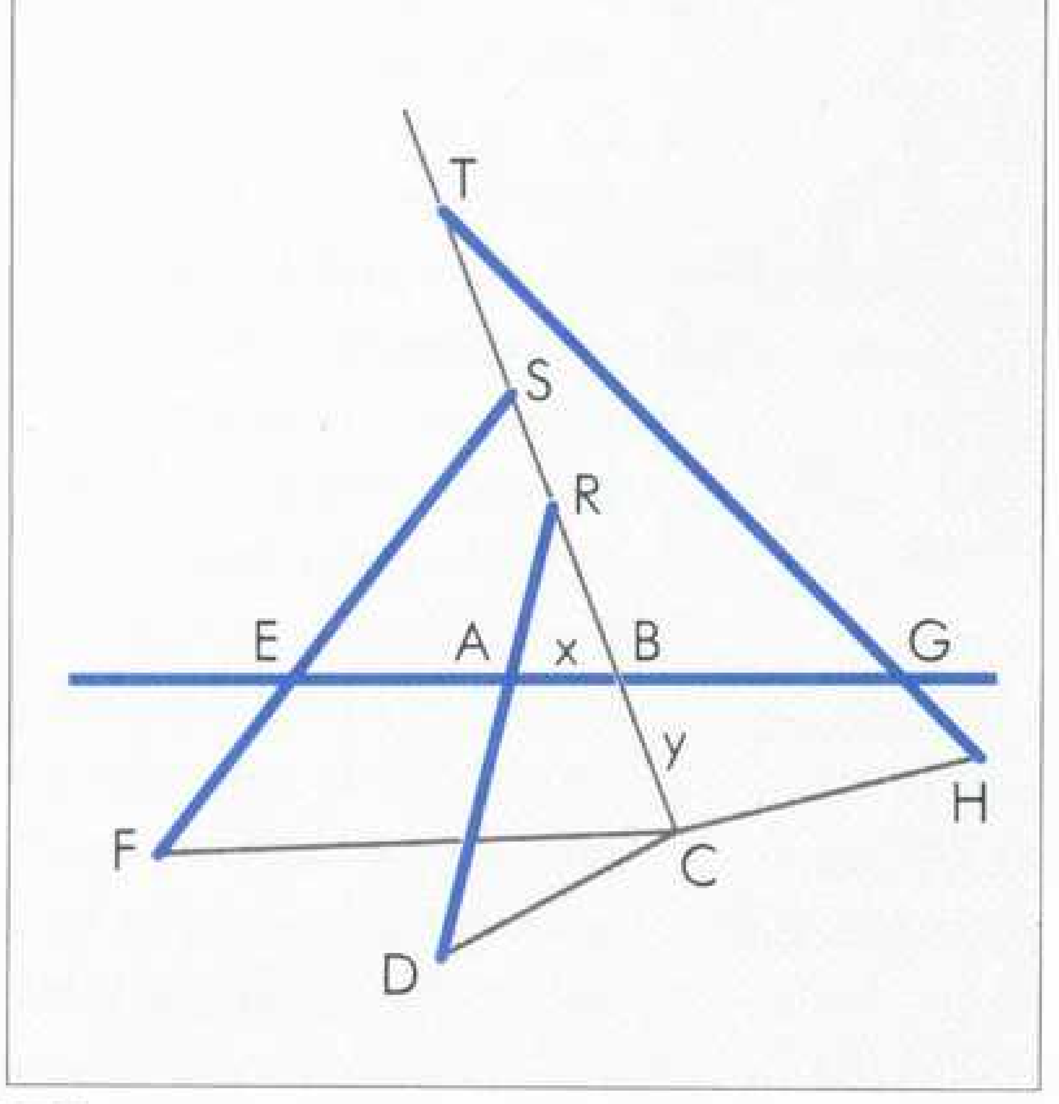
El enunciado se clarifica por medio de la figura: las rectas dadas son AB, AD, EF, GH, etc. Se trata de buscar un punto C tal que los ángulos CBA, CDA, CFE, CHG, etc., vengan dados y que los productos CB.CF y CD.CH sean iguales.

La clave estriba en el hecho de que los ángulos están dados. Así, cuando el punto C varía, el triángulo CFS, por ejemplo, cambia de tamaño pero no de proporción. Descartes introduce las coordenadas del punto C escribiendo AB = x y CB = y. Luego, expresa todas las longitudes en función de x, de y y de constantes que dependen de las posiciones de las rectas.

El problema se reduce a la resolución de una ecuación algebraica. Descartes encuentra los mismos resultados que los autores antiguos y demuestra además que, hasta nueve rectas, la solución puede obtenerse por medio de secciones cónicas; más allá, hay que introducir curvas de grado mayor.

Jean Brette

(1)
Descartes, *La Géométrie*, J. Hermann, París, 1927.



máticas. Las verdades matemáticas son objeto de una intuición que revela a la razón la «*verdadera e inmutable naturaleza*» de dichas verdades. Su evidencia lleva al espíritu, por poco que sea claro y esté atento, a la certidumbre.

Pero, ¿cómo fundar a su vez esta certidumbre sin admitir que estas verdades, como las demás verdades eternas, han sido creadas por Dios? «*Las verdades matemáticas* —escribe— *han sido establecidas por Dios y, lo mismo que el resto de las criaturas, dependen de él completamente.*»

Esta doctrina metafísica inédita de la creación de las verdades eternas —una doctrina irritante para los teólogos—[2] le permite considerar que, a través de las matemáticas, la razón logra captar la esencia misma de las cosas materiales, por lo que puede sacar de ellas el enunciado de las «*leyes de la naturaleza*». «*Es Dios quien ha establecido las leyes en la naturaleza, lo mismo que un rey dicta leyes en su reino.*»

Y estas leyes son innatas a nuestro espíritu, ya que Dios las ha impreso allí, «*como un rey imprimiría sus leyes en el corazón de todos sus sujetos si tuviera el poder de hacerlo*».

La física de Newton (leyes del movimiento, gravitación) se elaboraría en oposición al mecanicismo cartesiano

Descartes reivindica que esta doctrina metafísica ha inspirado sus más audaces trabajos en matemáticas, mecánica y óptica. Los *Principios de filosofía* exponen su física y su cosmología como rigurosamente deducidas de dichas tesis. Explica allí que solamente la extensión, sobre la cual se efectúan las demostraciones geométricas, constituye la naturaleza de los cuerpos.

Hay una única materia en el Universo, más o menos fluida o sutil, y la conocemos por el mero hecho de que se extiende en longitud, anchura y profundidad. La diversidad de las formas que allí se encuentran depende exclusivamente del movimiento local de sus partes en contacto mutuo. De la indefinida divisibilidad del espacio, así como de la negación de los átomos y del vacío, se deduce la cosmología de los torbellinos que tanto éxito tuvo y que, más tarde, le fue tan enérgicamente reprochada.

Newton, cuando se enfrentó directamente a Descartes y le opuso sus propios *Principios matemáticos de filosofía natural* (1687), rechazó la identificación de la materia con la extensión para instaurar una mecánica del punto material (libro I). Sobre esta base, desmontó pieza por pieza la teoría de los torbellinos (libro II) y le sustituyó el «*sistema del mundo*» regido por la gravitación universal (libro III). Pero, de paso, Newton negó a la metafísica todo derecho de ciudadanía en las ciencias físicas. Las «*reglas para filosofar*» que enunció sugerían con toda claridad que Descartes había sido víctima de su pretensión metafísica de descubrir las causas de los fenómenos. Newton, por su parte, quería dar ejemplo de sano método negándose a forjar cualquier hipótesis sobre la naturaleza de la fuerza de atracción.



Figura 3. Descartes se basó *en los trabajos de Kepler, su «primer maestro» de óptica, para elaborar su propia Dióptrica. Sus conocimientos de geometría le permitieron formalizar nuevas leyes.* (La vision, 1662, Bibl. Instit./J.L. Charmet.)

El positivismo aprovechó este diagnóstico para restringir las pretensiones de la ciencia a la formulación matemática de leyes basadas únicamente en la observación de los fenómenos.

Pero, ¿cayó realmente Descartes en la trampa de la «metafísica»? ¿No fue más bien víctima de la doctrina metafísica particular que tuvo la audacia de construir para acabar con la de Aristóteles? ¿No cometió el error de querer reconstruir sobre nuevas bases un sistema rival del de Aristóteles que pudiera explicarse en las escuelas? En cualquier caso, la tesis de la creación de las verdades eternas somete toda investigación sobre el mundo a la activi-

(2)
René Descartes et Martin Schook, *La Querelle d'Utrecht*, Les impressions nouvelles, París, 1988.

(3)
Faut-il brûler Descartes? Ed. La Découverte, París, 1991, donde Guitta Pessis-Pasternak ha reunido las reflexiones de eminentes pensadores, desde «el caos hasta la inteligencia artificial».

dad de un *ego* conocedor. Y el conocimiento adecuado al que puede llegar este *ego* se concibe como exactitud de una *representación*. Todas nuestras epistemologías son en definitiva tributarias de esta doctrina metafísica aun cuando la referencia a Descartes sea en ellas muy discreta y algunos de sus promotores hayan declarado una guerra explícita a la metafísica.

Descartes asignó al hombre moderno la misión de ser *«como amo y señor de la naturaleza»*. Acusándole de haber programado así la devastación del planeta por obra de la técnica científica, se olvida el abismo metafísico que abre en esta sentencia el *«como»* que en ella figura. El único y verdadero amo y señor de la naturaleza, es, a ojos de Descartes, Dios. Una vez desparecida la referencia teológica, ¿no es más bien la metafísica de la representación la que está en tela de juicio en el destino social de la técnica científica?

La inspiración de su método «analítico», se dice hoy, es el culto de la simplicidad y el desprecio correlativo de la «complejidad»[3]. ¿No sería más fecundo examinar en qué medida las prácticas y las teorías de la modelización de los sistemas complejos y de sus prolongaciones cognitivistas llevan también la huella de la epistemología «representativa» que Descartes impuso al pensamiento moderno en Occidente?

Así pues, en lugar de ceder a un anticartesianismo somero, ¿no debemos buscar las vías de la «epistemología no cartesiana» que Gaston Bachelard reclamaba en 1934, al final del *Nouvel Esprit Scientifique*?

No se trata de «eliminar» la metafísica del pensamiento científico, sino de tratar de reconsiderar sus presuposiciones liberándonos de las que Descartes nos legó como naturales.

D.L.■

Para más información

■ Frédéric de Buzon et Vincent Carraud, *Descartes et les «Principia» II*, PUF, París, 1994.
■ Daniel Garber, *Descarte's metaphysical physics*, University of Chicago Press, 1992.
■ Michio Kobayashi, *La Philosophie naturelle de Descartes*, Vrin, París, 1993.
■ Alexandre Koyré, *Estudios galileanos*, Siglo XXI, Madrid, 1990
■ Jean-Luc Marion, *Sur l'ontologie grise de Descartes*, Vrin, París, 1975.
■ Gaston Milhaud, *Descartes savant*, Félix Alcan, París, 1921.
■ Geneviève Rodis-Lewis, *Descartes, Biographie*, Calman-Levy, París, 1995.
■ Julles Vuillemin, *Mathématiques et métaphysique chez Descartes*, PUF, París, 1960.
■ Bernard Williams, *Descartes, el proyecto de la investigación pura*, Cátedra, Madrid, 1996.

CÓMO NO REALIZAR UN DESCUBRIMIENTO

Bruno Latour

Sin llegar a ser un Pasteur, Fleming no era indigno de su tiempo

BRUNO LATOUR
CSI, École des mines, París.

Comment Fleming n'a pas inventé la pénicilline, Les Empêcheurs de penser en rond, París, 1996, traducido al francés por Sophie Mayoux. Wai Chen trabaja en el Maudsley and Bethlem Royal Joint Hospital de Londres.

¿Por qué Alexander Fleming dejó de ver durante trece años una penicilina que sin embargo saltaba a la vista? Porque así lo quería el contexto institucional. A propósito de un libro de Wai Chen*.

El libro es delgado —menos de setenta páginas— y de título estimulante, pero el tema debería apasionar a todos los científicos que sueñan con marcar su tiempo con un descubrimiento tan importante como el de Alexander Fleming. Si la ciencia consistiera meramente en descubrir fenómenos ya presentes, como en el juego del escondite, sería fácil atribuir la palma al ganador. El que encontrara el fenómeno sería su «inventor» exclusivo. Inversamente, si la ciencia funcionara como la tecnología, nadie pretendería saber exactamente quién invento qué salvo para distribuir las ganancias. Entre el motor perfecto patentado por Rudolf Diesel y la maquinaria que treinta años más tarde equipaba los submarinos y paquebotes, la diferencia es tan grande de que se vacilará incluso en atribuir la paternidad de los potentes ingenios a su frágil inventor, el cual, por lo demás, al borde de la ruina, se tiró al canal de la Mancha.[1]

Las ciencias experimentales ofrecen una situación híbrida entre estos dos modelos: es preciso, sin duda, encontrar algo que nadie haya construido, como si la naturaleza jugara al escondite con nosotros; pero también hay que construir el fenómeno pieza por pieza transformándolo progresivamente.

La «penicilina» de Fleming tiene poco que ver con el futuro agente terapéutico revolucionario

El gran mérito del librito de Wai Chen, médico e historiador de la medicina, consiste en evitar tanto la hagiografía como la denuncia iconoclasta. En efecto, Fleming ha sido objeto de un culto casi tan intenso como el del Pasteur, pero también ha sido el blanco de una penosa controversia: ¿por qué no hizo nada durante trece años con una penicilina cuya función sin embargo saltaba a la vista? ¿Cómo es posible atribuir la paternidad de un descubrimiento a alguien que lo evita con tanta obstinación? ¿No hay que conceder todo el mérito a los británicos Howard W. Florey y Ernst B. Chain (que compartieron el Nobel con Fleming), o incluso al francés René Dubois, puesto que al fin lo obligaron a interesarse por su hallazgo? ¿No habría que atribuir a Fleming la famosa definición de Georges Canguilhem: *«El precursor es aquel del que después se sabe que vino antes»*? Respuesta de Wai Chen: Fleming descubrió, efectivamente, algo que llamó «penicilina», pero que no guarda relación con lo que más tarde, a partir de los años de guerra, se designaría con el mismo nombre. Cargando un poco las tintas, se podría decir que se trata casi de un caso de homonimia.

Tras una larga inmersión en los cuadernos de laboratorio, reconstruyendo, etapa tras etapa, el proceso de investigación, Chen nos da una lección magistral de filosofía empírica. Nos obliga a distinguir, en primer lugar, el sustantivo (penicilina) de la sustancia, y, en segundo lugar, la sustancia de los atribu-

tos de esa sustancia a la vez que vincula estas distinciones a las instituciones que les dan origen.

Solamente se puede definir un fenómeno por lo que hace, es decir, por las respuestas que da a las pruebas de laboratorio. En 1929, lo que Fleming llamaba «penicilina» actuaba como un ser completamente original que debía servirle de herbicida a fin de facilitarle el cultivo de un agente responsable de la gripe, una enfermedad que le interesaba en máximo grado[2] y contra la cual trataba, lo mismo que toda la institución donde trabajaba, bajo la dirección de Almroth E. Wright, de fabricar una vacuna.

Lo que detectó en el medio de cultivo no era pues «la penicilina», sino un agente que iba a permitirle desprender del ruido de fondo, con mayor claridad y precisión, el agente infeccioso que le interesaba por encima de todo. El título de su primer artículo lo expresaba bien a las claras: *«Sobre la acción antibacteriana de cultivos de un* Penicillium *con referencia especial a su utilización para aislar* B. influenzae».

(1) Véase el excelente dossier sobre Diesel propuesto por *Les Cahiers de science et vie*, nº 31, febrero de 1996.

(2) Millones de muertos en 1918-1919, más numerosos que todos los de la Gran Guerra, recordémoslo, y otras 12.000 víctimas en 1928 (p. 62).

Lo que a Fleming más le interesaba era acelerar la elaboración de una vacuna contra la gripe

En ningún momento «vio» Fleming en su cultivo un antibiótico. Por el contrario, afirma Chen, todo el laboratorio en el que trabajaba se esforzaba, por así decirlo, en no descubrir los antibióticos criticando, artículo por artículo, el programa de investigación de gente como el Nobel alemán Paul Ehrlich y de la quimioterapia. Wright se burlaba incluso del *«magic bullet»*, término bajo el que sin embargo se designarían más tarde los antibióticos.

Añadiendo penicilina a sus medios de cultivo, Fleming hacía, desde su propio punto de vista, un descubrimiento importante, pues aceleraba la elaboración de una vacuna contra la gripe. En ningún momento pretendió alterar su programa de investigación y tomar al herbicida que facilita la visualización del bacilo en un cultivo por el agente terapéutico mismo.

¿Era eso ceguera? No, explica Chen de modo convincente. Los atributos de una sustancia se agrupan bajo una forma y un nombre que dependen de la institución donde se trabaja: *«El contexto es el siguiente: unas epidemias de gripe mortales; el laboratorio de Wright con su fábrica de vacunas, donde Fleming desempeña el papel de director de produccción; unas voces que se alzan para dudar de la eficacia de las vacunas contra esta afección; la campaña global antiquimioterapia emprendida por el laboratorio; y, por último, las 105.000 libras esterlinas invertidas en el nuevo edificio del Instituto. Es en este contexto donde Fleming logra transformar la penicilina en un reactivo diagnóstico destinado al cultivo de bacterias —unos usos que concordaban perfectamente con sus intereses personales, profesionales e institucionales—»*.

¿Se trata de una explicación «externa», como si un juego de intereses impidiera la percepción de un fenómeno que, sin ellos, habría aparecido más claramente? No, pues Fleming tenía realmente ante la vista el fenómeno que describía. La penicilina hacía exactamente cuanto Fleming decía que hacía. Ningún prisma deformante sesgaba la representación exacta que otros podrían hacerse del mismo fenómeno en aquella época. Cuando diez o doce años más tarde se detectó «su» penicilina, se había modificado completamente el contexto institucional en el que se realizaba la observación. Los atributos habían sido modificados por completo. El reactivo diagnóstico se había convertido en el gran agente terapéutico de la segunda revolución médica. Entre la penicilina de Fleming y la de Chain y Florey, el vínculo no es ni más intenso ni más tenue que entre Diesel y los motores que oímos ronronear bajo nuestro capó. A los fenómenos les hacen falta unas sólidas instituciones tanto para aparecer como para transformarse.

Tal me parece la saludable virtud del librito de Wai Chen. Leyendo los elogios y las denuncias de Fleming, es imposible no decirse, con cierta presunción: *«Si yo hubiera estado allí, ante aquella mancha blanca que señalaba la destrucción de las bacterias por el* penicillium, *seguramente habría visto lo que realmente importaba»*. Después de leer a Chen, uno se dice, al contrario: *«Si yo hubiera trabajado en aquel laboratorio, en aquella época, habría compuesto la sustancia de mi bacteria con los mismos atributos y también habría perdido doce años sin darme cuenta»*.

Este librito, como todo libro de historia de la ciencia, fomenta la modestia, lo que supone una gran virtud, pero también alienta a visitar los laboratorios para detectar todas las «penicilinas» cuyas propiedades podrían ser modificadas duraderamente sin más que perturbar las instituciones y los programas de investigación que definen su visibilidad. Esta virtud es más saludable todavía.

B.L. ■

Historia y lecciones de las innovaciones: EL TERMÓMETRO

«MEDIR LOS GRADOS DE CALOR Y DE FRÍO»

André Giordan

ANDRÉ GIORDAN, director del laboratorio de didáctica y epistemología de la ciencia de la universidad de Ginebra.

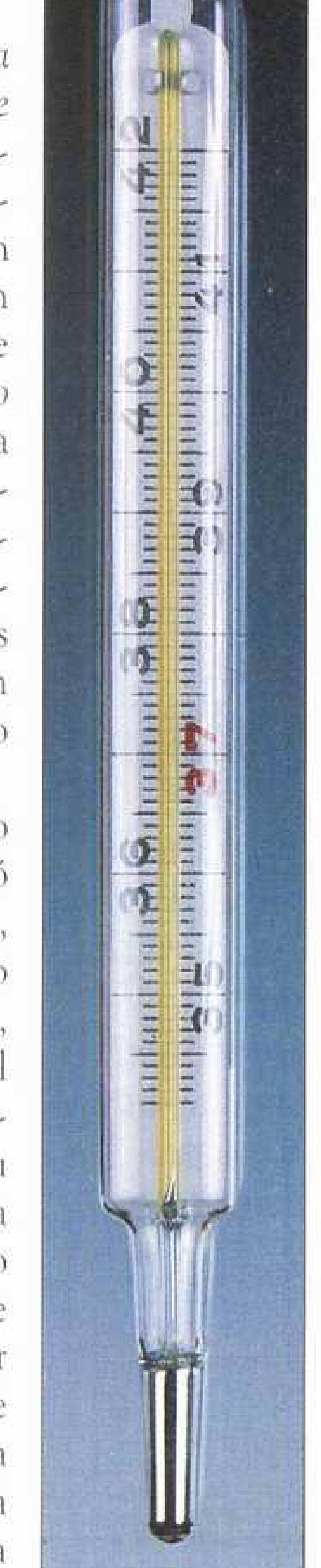
Fueron necesarios más de quince siglos para relacionar los movimientos del agua canalizada en un tubo con las variaciones del *«temperamento»* de los enfermos. Se tardó menos en sustraer estos cambios a la presión atmosférica y en definir un sistema satisfactorio de calibrado. Pero hubo muchos atajos.

«Al atardecer la temperatura será de 20 °C en Barcelona y de 15 °C en Madrid...» Para la mayor parte de nosotros, las informaciones meteorológicas son plenamente significativas. Sin embargo, nada es tan difícil de fijar como *«la medida del grado de frío y de calor»*, como se decía en el Renacimiento.[1] En el origen de esta técnica se encuentran, como tantas veces, científicos-ingenieros griegos. Los principios en que se basaban dos de sus aparatos han llegado hasta nosotros.

Sin embargo, fue un médico de Padua, Santorio, que vivió entre los siglos XVII y XVIII, quien, ávido de medir todo lo referente al cuerpo humano, emprendió la evaluación del *«temperamento»* de sus pacientes o, dicho de otro modo, su fiebre. Su *thermoscopium* consta de un tubo largo y estrecho introducido en un recipiente lleno de agua y coronado por una bolita de vidrio llena de aire. El enfermo cogía la bolita con la mano o se la introducía en la boca y Santorio anotaba el desplazamiento de la columna de agua. El termómetro, como lo llamaría más tarde el jesuita Jean Leurechon, estaba inventado.

El interés suscitado por el aparato se desplazó de la fisiología a la meteorología. La idea de *«medir los grados de calor y de frío»*, según la fórmula acuñada en 1624 por el último autor mencionado, estaba en el aire. Un gran número de investigadores se emplearon en la tarea, entre ellos Galileo, a quien se le atribuyó erróneamente la paternidad del instrumento.

La invención planteaba más problemas de los que resolvía: pese a lo cuidado de su construcción, los aparatos de aire parecían poco precisos y sobre todo expuestos a todo tipo de variaciones.



(Foto Labat/Jerrican.)

De hecho, como demostrara Evangelista Torricelli en 1644, la presión atmosférica intervenía en gran medida. Pero una cuestión intrigaba sobremanera: ¿había alguna relación entre la temperatura, supuestamente obtenida por medio del termómetro, y el grado de calor que se pretendía medir? Se tardó muy poco en comprobar que se podía suministrar calor sin provocar cambio alguno de temperatura... Pasaron varios años antes de que se pensara en los cambios de estado. Una primera manera de esquivar la cuestión de la presión atmosférica fue desarrollada con éxito por el gran Duque de Toscana, Fernando II de Médicis. Ayudado por hábiles artesanos, este último colocó en una probeta llena de «espíritu de vino» (alcohol con más o menos «flema», es decir, más o menos puro) bolitas huecas de similar densidad aparente, aunque todas ellas distintas.[2] El mismo equipo construyó un primer termómetro sellado con alcohol. Se probó con distintos líquidos: agua, mercurio, petróleo, aceite de lino o de tártaro (potasa). Lamentablemente, no tardó en constatarse que los líquidos no siempre se dilataban de manera proporcional. A pesar de todo, estuvo en uso durante todo el siglo XVIII un modelo de termómetro «florentino» a 50°. Su escala era puramente empírica.

En 1665, el físico inglés Robert Hooke propuso fijar el cero tomando como referencia el punto de congelación del agua destilada. Los grados correspondían a milésimas del volumen inicial. Este método fue retomado por el francés Réaumur en 1730 para *«construir unos termómetros cuyos grados son comparables y que dan idea de un calor y un frío en correspondencia con datos conocidos»*. No obstante, la temperatura de ebullición del agua seguía siendo variable: entre 80° y 100° Réaumur. Se propusieron otras referencias: el punto de congelación del agua y la fusión de la mantequilla, la fusión de la nieve y la temperatura del cuerpo humano (Newton en 1701) o la temperatura de una mezcla de hielo y sal. Las escalas elegidas, por su parte, eran de lo más variado. En el siglo XVIII había hasta cien graduaciones diferentes.

Un físico alemán, Daniel Gabriel Fahrenheit, tomó como puntos fijos el punto de fusión del hielo y la temperatura de la sangre en el cuerpo humano. En 1717, Fahrenheit acometió la realización de un termómetro de mercurio más preciso; tomó la temperatura de fusión del hielo como igual a 32° y la de la sangre humana como igual a 90° y luego a 96° para que fuera múltiplo de la primera. Sus sucesores normalizaron este tipo de termómetro eligiendo la fusión del hielo y la ebullición del agua (212 °F).

Pese al empirismo del método, esta escala se mantiene en los países anglosajones. Bien es verdad que los instrumentos producidos eran de excelente calidad. La división centesimal entre el punto del fusión del hielo y la temperatura de ebullición del agua, por su parte, se remonta solamente a mediados del siglo XVIII. Un físico sueco, Ander Celsius, y un secretario de la Academia de Bellas Artes de Lyon, Jean-Pierre Christin, fueron, independientemente, sus inventores. Pero ellos no tuvieron ningún éxito. Hubo que esperar a que la Comisión de pesos y medidas de la Convención decidiera que el *«grado termométrico será la centésima parte de la distancia entre el término del hielo y el del agua hirviendo»*. En 1948, en la Conferencia internacional de pesos y medidas, este grado se convirtió en referencia bajo el nombre de grado Celsius antes de que el físico británico Kelvin inspirara la referencia científica que lleva su nombre.

A.G. ■

(1) Hasta el siglo XVII en los medios científicos y hasta finales del siglo XIX para la vida cotidiana, el calor era considerado como una sustancia, lo mismo que el frío, y los dos se contemplaban como fenómenos distintos. Se suponía que todo cuerpo contenía una cantidad más o menos grande de dichas «sustancias».

(2) La temperatura hacía variar las condiciones de flotación de cada una de ellas; la que llegaba a la superficie indicaba la temperatura ambiente. Este termómetro, llamado erróneamente «de Galileo», sigue comercializándose.

TERTULIA

El todo y sus (propias) partes

Jorge Wagensberg



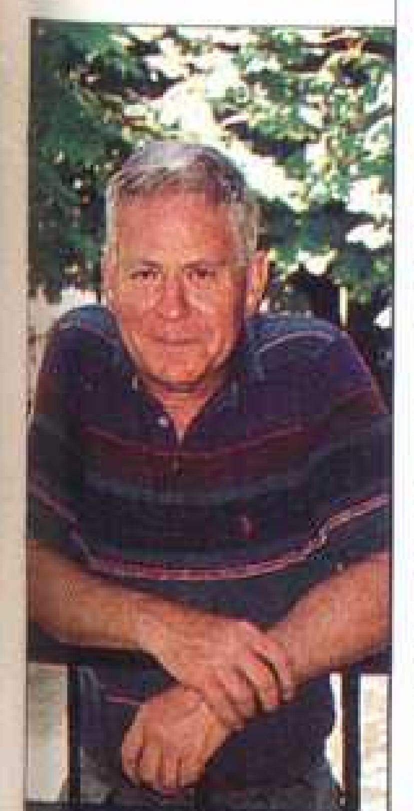
JORGE WAGENSBERG
es físico y director del Museo de la Ciencia de Barcelona

La perturbación que producen dos niños llorando juntos no tiene por qué ser la suma de las perturbaciones que estos mismos niños provocan cuando lloran por separado. Si al ponerse en contacto, surge un conato de pelea o de competencia, entonces el berreo conjunto puede ser mayor que el que resulta de la suma de los dos berreos individuales; es decir, el escándalo global arrecia. Si, por el contrario, lo que se establece es una corriente de mutua curiosidad, entonces es bien posible que el escándalo global amaine, incluso que ambos terminen muertos de risa entre los todavía gruesos lagrimones. (Sólo en el improbable caso de la indiferencia, ocurre que el todo es la suma trivial de las partes.) Este sencillo ejemplo ilustra, de hecho, toda una forma de inteligibilidad científica, toda una manera de comprender el mundo. El científico puede decir que *comprende* si es capaz de inventar una representación (un modelo) que relacione las tres ideas: el todo (el superniño AB), las partes (los niños A y B) y la interacción (el Conjunto de las mutuas reglas de juego). Se puede predecir así el fenómeno *superniño* a partir del concepto niño: es *la síntesis* (de las partes al todo). En el sentido inverso se puede descubrir la existencia del fenómeno *niño* a partir (nunca mejor dicho) del concepto superniño: es *el análisis* (del todo a las partes). Y todo ello a base de ensayar las diferentes interacciones posibles que hagan encajar, cada vez mejor, el conjunto de todos los comportamientos observables: es el más antiguo, noble, seguro, sólido, riguroso, fiable y prestigioso de los procedimientos de la investigación científica: *el tanteo*. Un todo tiene infinitas particiones posibles. Es cierto, pero no todas tienen la misma trascendencia. Porque sólo son relevantes aquellas partes que merecen, a su vez, la categoría de individuo, la de otro todo susceptible quizás, él también y a otro nivel, de una ulterior partición razonable. El todo y sus partes sugieren una inteligibilidad más potente que la que surge de la causalidad (decir que se comprende porque se han identificado unas causas) o de la ley expresable matemáticamente (decir que se comprende de porque muchas situaciones distintas pueden ser comprimidas en una misma clase o en una breve secuencia de guarismos). En el estudio de sistemas complejos, cuando no es posible encontrar una sola causa o no es posible evitar demasiadas, o cuando nos topamos con el sofoco de que la mejor ley es más larga que los datos a comprimir, entonces se impone la inteligibilidad del todo y sus partes. Es cuando el físico comprende una sustancia como un todo de unidades estables llamadas moléculas; cuando el ingeniero comprende un puente como un compromiso de fuerzas; cuando unos individuos llamados células interaccionan para crear un metazoo capaz de sobrevivir; o cuando unos individuos humanos les da por formar una familia, un grupo, un barrio, una ciudad, una cultura, una nación, una federación o todo un planeta... con cierta verosimilitud de covivencia. La interacción humana está hecha de materia, energía y, sobre todo, de conocimiento. Pero no se piensa sólo a la escala de las mujeres y de los hombres. También piensan las familias, los grupos, los barrios, las ciudades, las culturas, las naciones y, al hacerlo, crean intrincados mapas de estabilidades posibles. Las tradiciones y las creencias permiten evaluar las interacciones. Pero la convivencia humana es, ¡ay!, una cuestión de inteligibilidad científica. ■

NATURALEZA Y ARTIFICIO

Cita fallida

Pierre Laszlo



PIERRE LASZLO
profesor de química de la Escuela politécnica y de la universidad de Lieja.

Descartes nació el 31 de marzo de 1596. ¿Cómo veía la química este espíritu universal? Con severidad. En su carta del 23 de noviembre de 1646 a William Cavendish (1592-1676), marqués de Newcastle, Descartes se quejaba de los químicos que *«no hacen otra cosa que decir palabras alejadas del uso común para dar a entender que saben cosas que en realidad ignoran»*.

Cuando Descartes trata de cuestiones de química, como en la cuarta parte de los *Principios de filosofía* (1644), las explicaciones que propone son confusas e impregnadas de escolástica. Descartes hace suya la distinción aristotélica entre dos exhalaciones de la tierra, la seca y la grasa, y construye todo un sistema de vapores, espíritus y exhalaciones. Piensa que los distintos metales son debidos a distintas agrupaciones geométricas de los tres principios de Paracelso: la sal, el azufre y el mercurio. Cree que la sal marina, el salitre y la sal amoniacal son tres accidentes de una misma sustancia. Descartes confía demasiado en el razonamiento puro, en la especulación. La noción germinal de la química como ciencia experimental no se le ocurre siquiera.

En aquel entonces, la química era una ciencia naciente. El excelente *Tyrocynium chymicum* o *Debutante en química* de Jean Béguin (c. 1550- c. 1635) es de 1611. Era precisa una teorización preatómica. Esta teorización la debemos no a Descartes, sino a Gassendi, al que Descartes trataba con desprecio. Gassendi tuvo la intuición (casi una conversión en sentido religioso) de que el atomismo de Epicuro era pertinente, por lo que emprendió su reedición y difusión. El hecho fue fecundo para Newton y los creadores de la química moderna. Marin Mersenne (1588-1648), corresponsal parisiense de Descartes, estaba dividido entre su fidelidad a este último y su gran amistad hacia Gassendi. Le debemos un libro muy interesante, *La Verdad de las Ciencias* (1625), diálogo entre un químico y un filósofo cristiano, portavoz del autor.

La tesis del químico, próximo a los experimentadores ingleses, es que la ciencia, por el hecho de basarse en la observación, se convertirá en instrumento básico para el estudio de la naturaleza. El filósofo cristiano, cuya tesis resulta victoriosa (tanto en el libro de Mersenne como, después, en la historia de la ciencia), pretende que el progreso sólo puede proceder de una matematización del saber.

Descartes y la química: dos trenes que se cruzan en la noche. Todavía estamos sufriendo las consecuencias. ■

«¡Un niño de 5 años lo comprendería! ¡Traedme a un niño de 5 años!», Groucho Marx

LA LUZ

Maurice Mashaal

La luz, al iluminar los objetos, nos ayuda a conocer el Universo en que vivimos. Por una curiosa inversión de la situación, ha sido el descubrimiento de las propiedades de la luz lo que ha permitido a los físicos cambiar nuestra visión del mundo.

MAURICE MASHAAL es periodista de *La Recherche*. Este artículo ha sido realizado en colaboración con **CLAUDE COHEN-TANNOUDJI,** físico y profesor del Collège de France de Paris.

¿Ondas o corpúsculos?

La indagación de la naturaleza de la luz se remonta a la antigüedad. Los pitagóricos y Euclides, por ejemplo, creían que el ojo enviaba unos rayos que, al tocar un objeto, permitían verlo. Pero las primeras respuestas satisfactorias no llegaron hasta el siglo XVII. El holandés Christiaan Huygens, especialmente, elaboró en 1678 una interpretación de la luz en términos de ondas, esto es, de vibraciones que se propagan. Su teoría ondulatoria explicaba muy bien las leyes de la reflexión* y la refracción* de la luz. Este punto de vista chocó con el de Isaac Newton, para quien la luz estaba formada por pequeñísimos corpúsculos. La reputación de Newton era mayor que la de Huygens, por lo que la teoría ondulatoria, más pertinente en aquella época, fue descartada. No obstante, dicha teoría se tomó la revancha a principios del siglo XIX... Pero sólo provisionalmente, pues la física cuántica, nacida entre 1900 y 1930, demostraría que la realidad es mucho más sutil que la alternativa onda-partícula.

reflexión

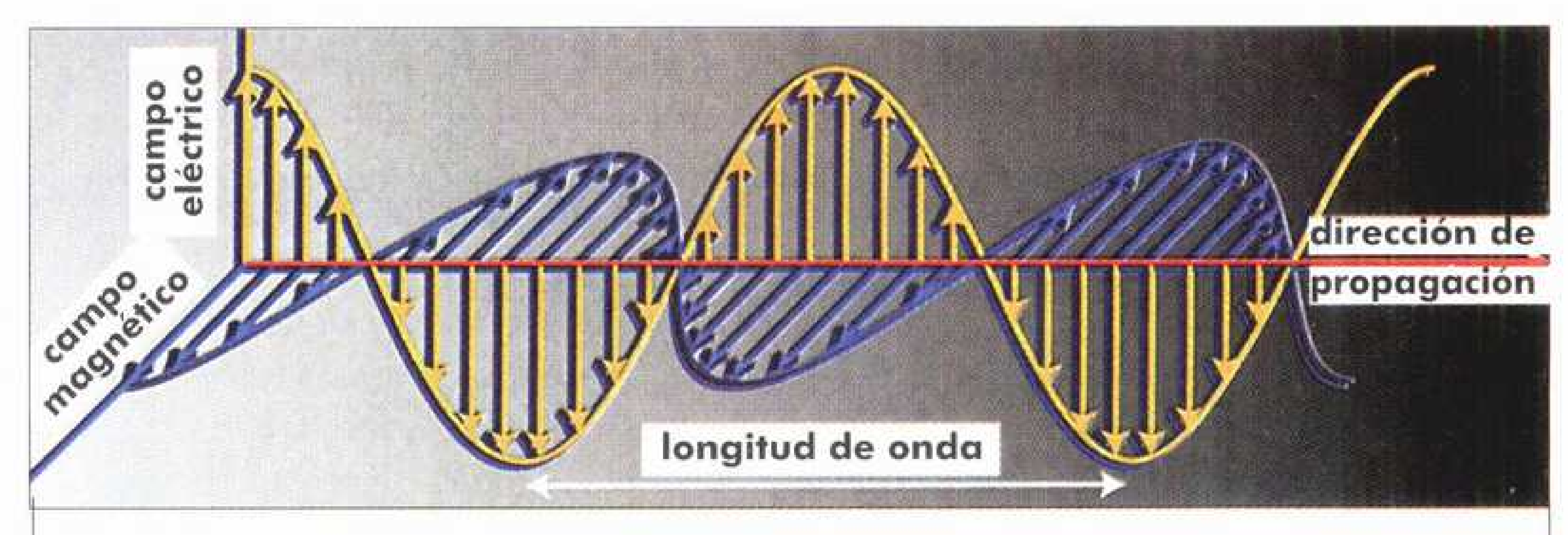
refracción

¿Cuál es su velocidad?

Se ha creído durante largo tiempo que la luz se propagaba instantáneamente, a velocidad infinita. En 1676, el danés Oläus Römer midió una velocidad muy grande, aunque finita, analizando el tiempo que separa las ocultaciones de Io, satélite de Júpiter. Al físico francés Hippolyte Fizeau se debe, en 1850, la primera medida terrestre que no recurría a la astronomía: unos 313.000 km/s. Su método consistía en medir el tiempo empleado por la luz en realizar un viaje de ida y vuelta entre una rueda dentada en rápida rotación y un espejo. Dado que la luz, en la ida como en la vuelta, debía pasar por un hueco de la rueda dentada, la medida de la velocidad de rotación de ésta permitía calcular la velocidad de la luz. La precisión fue mejorando a lo largo de los decenios. Así pues, en nuestros días, la velocidad de la luz es tan bien conocida que se la utiliza para definir la unidad de longitud: desde el año 1983, la velocidad de la luz en el vacío vale, por convención, 299.792.458 metros por segundo. El metro, por lo tanto, se define como la distancia recorrida por la luz en 1/299.792.458 de segundo.

¿Ondas? ¿Qué ondas?

La teoría ondulatoria de la luz culminó con los trabajos del físico escocés James Clerk Maxwell sobre el electromagnetismo, hacia 1864. Conclusión: una onda luminosa es una onda electromagnética entre otras; consiste, pues, en la combinación de un campo magnético y un campo eléctrico oscilantes que se propagan por el vacío. La dirección de propagación, el vector campo eléctrico y el vector campo magnético de dicha onda son perpendiculares dos a dos (véase esquema). Por su parte, la intensidad luminosa medida en un punto es proporcional al cuadrado de la amplitud* del campo eléctrico en dicho punto.



Por razones de índole matemática y física, las ondas que tiene interés considerar son las ondas puramente sinusoidales, de frecuencia y longitud de onda perfectamente definidas. La luz visible corresponde a una gama muy estrecha de ondas electromagnéticas, aquéllas cuya longitud de onda está aproximadamente comprendida 0,4 y 0,8 micrómetros (los límites exactos dependen de la capacidad visual de los individuos). Su frecuencia, inversamente proporcional a la longitud de onda, es extremadamente elevada, del orden de los 10^{15} hertzios (1 hertzio = 1 oscilación por segundo).

AMPLITUD, FRECUENCIA Y FASE
Para una onda sinusoidal, la vibración en un punto puede escribirse en la forma $A \cos(2\pi\nu\ t + \phi)$, donde t es el tiempo, A la amplitud, ν la frecuencia y ϕ la fase respecto a la onda $A \cos(2\pi\nu t)$.

¿Y los fotones?

El regreso de la noción de corpúsculo se produjo en 1900, cuando el investigador alemán Max Planck trataba de resolver un problema importante: hallar la ley que describe correctamente la radiación electromagnética emitida por los objetos en función de su temperatura. Planck observó que se obtenía una ley realista a condición de suponer que las ondas electromagnéticas emitidas o absorbidas transportan una energía igual a un múltiplo entero del valor $h\nu$, donde h es una constante muy pequeña (la «constante de Planck») y ν la frecuencia de la onda considerada. Nacía así la noción de cuanto de energía, sin que Planck se percatase de su significado.(1)

La idea fue mejor explotada por Albert Einstein cinco años más tarde en su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico (que consiste en que un haz luminoso que incide sobre un metal puede arrancarle electrones si la frecuencia de la radiación sobrepasa un cierto umbral). Einstein explicó todas las propiedades del efecto fotoeléctrico suponiendo que la energía luminosa es transportada por unas partículas que unos años más tarde serían llamadas «fotones», cada una de ellas con una energía igual a $h\nu$.

Regreso a la pregunta: ¿ondas o corpúsculos?

Con el concepto de fotón apareció la llamada «dualidad onda-corpúsculo» de la luz: ésta posee una doble naturaleza, continua y discontinua. El aspecto ondulatorio, continuo, se manifiesta en fenómenos tales como la refracción y la interferencia (véase más adelante). El aspecto corpuscular, discontinuo, se manifiesta, por ejemplo, en los intercambios de energía o de cantidad de movimiento con la materia.

En 1924, el francés Louis de Broglie extendió la dualidad onda-corpúsculo a todas las partículas materiales, una hipótesis que los experimentos confirmaron más tarde. Esta extraña propiedad es, pues, universal, aunque más flagrante en el caso de la luz. Más allá de la dualidad onda-corpúsculo, la descripción teórica de las ondas electromagnéticas y de sus interacciones con la materia constituye el objeto de la «electrodinámica cuántica», la teoría cuántica del electromagnetismo cuyos fundamentos fueron establecidos entre 1927 y 1949. El fotón aparece en ella como el vehículo de la interacción electromagnética entre partículas elementales eléctricamente cargadas.

En resumen, pues, la luz no está hecha ni de ondas ni de partículas. Su naturaleza sólo puede describirse correctamente en el marco de la física cuántica y lamentablemente no puede comprenderse en términos intuitivos.

¿A qué corresponden los colores?

El color consiste en la excitación de los pigmentos visuales del ojo por la luz y en la percepción de ésta por el cerebro;[II] no es, pues, una propiedad intrínseca de la luz. Cuando nuestro ojo capta una onda luminosa de frecuencia (y longitud de onda) bien definida, percibimos un color bien determinado: la correspondencia abarca, aproximadamente, desde el violeta a 0,4 micras de longitud de onda hasta el rojo a 0,8 micras, pasando por el azul, el verde, el amarillo y el anaranjado. Ésta es la razón por la cual se dice que una onda de frecuencia bien definida es monocromática (del griego *khrôma*, color). La inversa no es cierta: lo que percibimos como rojo, por ejemplo, no necesariamente es una luz monocromática de 0,6 o 0,7 micrómetros de longitud de onda; también puede resultar de una mezcla de varias radiaciones monocromáticas. La sensación de blanco, por su parte, se produce cuando todos los colores están mezclados en proporciones más o menos iguales. De hecho, todo color puede obtenerse combinando tres colores básicos elegidos de forma arbitraria y haciendo variar sus intensidades respectivas. Por otro lado, el color de objeto depende de varios factores, de los cuales los principales son las longitudes de onda de las radiaciones absorbidas o difundidas y la composición de la luz circundante.

CHANGE
CAMBIO

POR UN BILLETE VERDE LE DOY UNO AMARILLO Y OTRO AZUL





¿Se propaga siempre la luz en línea recta?

En un medio homogéneo y transparente, como el aire, el vidrio, el agua, etc., la luz se propaga de un modo rectilíneo. En tal situación, los rayos de luz, aunque imaginarios, constituyen una noción pertinente. Es el dominio de la llamada óptica geométrica. Pero cuando la luz encuentra obstáculos o aberturas de tamaño inferior o del orden de la longitud de onda, los fenómenos ondulatorios se vuelven preponderantes y ya no es posible atribuir a la luz una trayectoria. Se asiste en tal caso a efectos complejos de dispersión* y difracción*, en los cuales interviene a un nivel u otro la interferencia de la luz consigo misma.

Por esta razón, un microscopio óptico no permite distinguir detalles de finura menor que unos 0,5 micrómetros; un haz luminoso que atraviesa un orificio de este tamaño no sigue en línea recta sino que, a la salida, es difractado en todas direcciones.

A escala astronómica, la luz sigue una trayectoria curva cuando se propaga cerca de una masa muy importante. Esto es lo que predice la teoría de la relatividad general de Einstein. Según esta teoría, la atracción gravitacional es de origen geométrico: toda masa deforma el espacio-tiempo a su alrededor, por lo que todo objeto (luz incluida) situado en sus proximidades ve modificada su trayectoria en consecuencia. El efecto fue verificado por primera vez en 1919 con ocasión de un eclipse solar; una estrella situada aproximadamente en la misma dirección que el Sol apareció en una dirección ligeramente distinta de la que se habría observado si el Sol hubiera carecido de masa.

El fotón

Masa: 0

Carga eléctrica: 0

Energía: $E = h\nu$

Cantidad de movimiento: $p = h\nu/c = h/\lambda$

Momento cinético intrínseco (espín): $J = 1$ *(en unidades* $h/2\pi$*)*

Helicidad (proyección del espín sobre la dirección de propagación): $+1$ o -1.

Interacciones: el fotón transporta la fuerza electromagnética; sólo interactúa directamente con las partículas elementales cargadas (electrones y quarks).

Comportamiento colectivo: por ser su espín entero, el fotón es un bosón, lo cual significa que el número de fotones que pueden encontrarse en el mismo estado cuántico no está limitado.

(h = constante de Planck = $6{,}626... \times 10^{-34}$ *joule.segundo,*
λ *= longitud de onda,*
c = velocidad de la luz = 299 792 458 m/s, ν *= frecuencia)*

¿Es constante la velocidad de la luz?

La velocidad de la luz en el vacío, representada por c, es una de las tres o cuatro constantes fundamentales de la física; es independiente de la frecuencia de la radiación. En un medio material, en cambio, su valor es menor y, debido a la interacción con los átomos, varía con la frecuencia. Una consecuencia de este hecho es el fenómeno de la refracción. El índice de refracción, que es el cociente c/v, donde v es la velocidad de la luz en el medio, depende del material considerado y de la frecuencia luminosa. Por ello, la luz blanca que atraviesa un prisma sufre una descomposición en varios colores; por la misma razón, cuando los rayos del Sol atraviesan gotitas de lluvia, se forma el arco iris.

Una propiedad capital de la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío es su invariancia; su valor es el mismo cualquiera que sea el movimiento del observador, tanto si éste está inmóvil como si viaja, digamos, a 200.000 kilómetros por hora. La física clásica no podía explicar este extraño hecho, que sólo encontró adecuada cabida en la teoría de la relatividad restringida, elaborada por Einstein en 1905. En ella, la velocidad c de la luz no sólo es absoluta sino que, además, aparece como un límite máximo de todo movimiento de materia y energía.

ESPECTRO DE EMISIÓN
Es el conjunto de las frecuencias (o longitudes de onda) representadas en la radiación. Para caracterizar completamente el espectro hay que especificar la intensidad emitida a cada frecuencia.

¿Cómo se produce la luz?

Casi toda la radiación electromagnética visible es debida a un único proceso básico: cuando un electrón es frenado o pierde energía, el excedente de energía se emite en forma de un fotón.

Sabemos actualmente que la energía de los electrones atómicos sólo puede adoptar ciertos valores. Cuando un tal electrón pasa de un nivel de energía a otro inferior, emite un fotón. Las diferencias entre los niveles de energía atómicos son tales que los fotones emitidos en estos procesos de desexcitación corresponden a menudo a luz visible, infrarroja o ultravioleta. La serie de frecuencias que pueden ser emitidas por los electrones de un átomo forman un «espectro de emisión»* discreto (también llamado espectro de rayas) que constituye una especie de documento de identidad del átomo o de la molécula. El espectro discreto se observa, por ejemplo, haciendo pasar una corriente eléctrica por un gas frío.

En un material que no se encuentre en el estado de vapor frío, los átomos o moléculas interactúan y se mueven continuamente debido a la agitación térmica. Al espectro discreto se añade entonces la emisión de otras longitudes de onda, tan numerosas que prácticamente todas (incluso las que no pertenecen al dominio visible) están representadas: es el «espectro continuo». Este espectro continuo varía con la temperatura y es en gran medida independiente de la naturaleza del material. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la frecuencia (y menor la longitud de onda) a la que corresponde el máximo de emisión. A temperatura ambiente, la radiación es invisible porque corresponde sobre todo al infrarrojo. A unos pocos cientos de grados, sin embargo, el material se vuelve rojo (como el hierro calentado al rojo); luego, si sigue aumentando la temperatura, el color pasa a ser anaranjado, amarillo, etcétera.

THOMAS YOUNG
Médico y físico inglés (1773-1829).

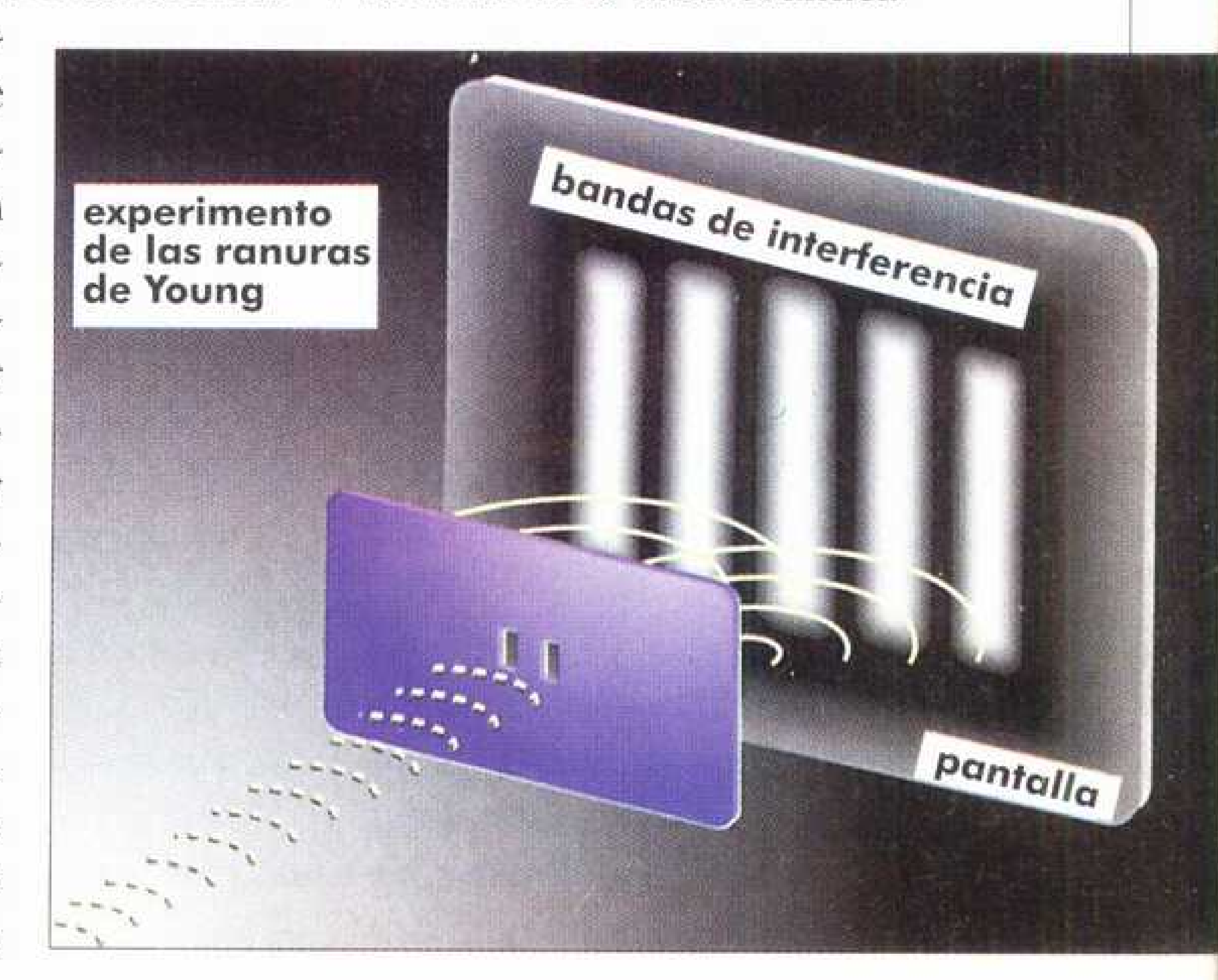
¿Qué son las interferencias luminosas?

Suele ilustrarse el fenómeno de las interferencias por medio del famoso experimento de las rendijas de Young*, en el que dos rendijas próximas son iluminadas con un haz monocromático coherente (véase esquema). Cada rendija se convierte en fuente de una onda que se propaga más allá, en dirección a la pantalla. En la región en la que las dos ondas salientes se solapan, esta pantalla, contrariamente a lo que cabría esperar, no está doblemente iluminada en todo punto sino que presenta unas «franjas de interferencia», es decir, una alternancia de regiones claras y oscuras.

¿Cómo explicar este efecto? Cuando dos ondas electromagnéticas se superponen en una cierta región del espacio, el campo eléctrico (o magnético) total en un punto es igual a la suma vectorial de los campos de cada una de las dos ondas incidentes. Este principio de adición (que se aplica también a otros tipos de ondas, como las ondas sonoras) está en la base del fenómeno: cuando dos ondas de igual frecuencia se superponen, la intensidad detectada en un determinado punto queda reducida o incrementada según el valor del desfase entre las ondas en dicho punto (ya que la intensidad de la luz es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo).

¿Cómo entender el fenómeno en términos de fotones? La intensidad luminosa medida en un punto dado de la pantalla es proporcional a la probabilidad de detectar allí un fotón. Pero no es posible afirmar que los fotones detectados han atravesado una rendija y no la otra: si se obstruye una de las rendijas, desaparecen las franjas de interferencia. Por lo demás, las interferencias no derivan de una eventual interacción entre fotones: con una pantalla capaz de registrar los impactos de fotones individuales (por ejemplo una placa fotográfica) se puede asistir a la progresiva constitución de las franjas de interferencia aunque la luz incidente tenga una intensidad lo bastante débil para que nunca pase más de un fotón a la vez por las rendijas. Se trata de unas propiedades completamente inexplicables si no se recurre a la dualidad onda-corpúsculo.

La relativa facilidad con que pueden observarse las interferencias luminosas se debe en parte a que las longitudes de onda de la luz visible no son ridículamente pequeñas. Ello explica también el que los fotones constituyan un instrumento idóneo para los experimentos destinados a someter a prueba ciertas sutilezas de la física cuántica.



Mundo Científico ha publicado:
(I) «Einstein y la discontinuidad cuántica», junio, 1990.
(II) «Los genes de la visión de los colores», marzo, 1995.
(III) «El láser en medicina», septiembre, 1993.
(IV) «Los láseres teravatios entran en materia», febrero, 1992.
(V) «La aparición de los láseres azul y verde», febrero, 1995.
(VI) «El láser X se hace realidad», diciembre, 1993.
(VII) «El enfriamiento de los átomos por medio del láser», marzo, 1994.
(VIII) «La extraña condensación de los átomos fríos», diciembre, 1995.

Para más información

- Artículo «Light» en *Encyclopaedia Britannica*, vol. 10, pp. 928-949, 1976.
- R. Feynman, QED, *The Strange Theory of Light and Matter*, Princeton University Press.
- F. Hartmann, *Les lasers*, col. «Que-sais-je?», PUF, 1991.
- Artículo «Lumière» en *Encyclopaedia Universalis*, vol. 11, pp. 276-311, 1985.
- J.-Ph. Pérez, *Optique*, Masson, 1994 (4ª ed.).
- R. Guenther, *Modern optics*, Wiley, 1990.
- C. Cohen-Tannoudji, J. Dupont-Roc y G. Grynberg, *Photons et atomes*, InterÉditions, 1987.

¿Qué es la polarización?

Cuando el campo eléctrico de la onda luminosa oscila en una dirección fija (como en el esquema de la página 580), se dice que la luz está polarizada linealmente. Pero el vector campo eléctrico puede girar también alrededor de la dirección de propagación de la onda, en cuyo caso se habla de polarización circular (o elíptica, en el caso general) dextrógira o levógira según el sentido de rotación. En términos de fotones, una polarización circular corresponde a un estado de helicidad (véase recuadro) bien definida (+1 o −1 según el sentido de rotación).

La luz solar, o la que emite una bombilla corriente, no presentan una polarización determinada. Pero se puede polarizar la luz, por ejemplo, haciendo que se refleje sobre una superficie bajo un ángulo bien elegido o haciéndola pasar a través de ciertos materiales, como el cristal de espato de Islandia. Los fenómenos de polarización se aplican a la fotografía (filtros polarizantes que atenúan las reflexiones indeseables), en química (dosificación de sustancias ópticamente activas), en microscopía de muestras minerales, etc. Además, ciertos animales, como las abejas, perciben la polarización luminosa y la utilizan para orientarse (la dispersión de la luz solar por las moléculas de la atmósfera actúa sobre la polarización en función de la posición relativa del Sol, del observador y del punto al que éste mira).

¿Qué tiene de tan especial la luz láser?



Los láseres (acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) son unos dispositivos inventados hacia 1960 que explotan los procesos de emisión y absorción de los fotones por los átomos. Contrariamente a las demás fuentes luminosas, producen un haz casi monocromático, es decir, de frecuencia y longitud de onda bien definidas. Además, el rayo emitido por un láser es muy fino y poco divergente, de donde una energía luminosa fuertemente concentrada. Una ventaja crucial de la luz láser es su gran «coherencia»: la vibración del campo eléctrico en un punto del haz presenta un desfase bien determinado (no aleatorio) con la vibración en otro punto y ello aunque la distancia que separa ambos puntos sea relativamente grande (hasta varios metros). Esta propiedad de coherencia, esencial para observar fácilmente los fenómenos de interferencia, no se da en una bombilla clásica, que emite en instantes aleatorios diversas ondas luminosas independientes entre sí.

Las propiedades excepcionales de los láseres explican sus numerosísimas aplicaciones, en investigación fundamental, medicina,[III] lectura de discos CD, troquelado industrial, medida precisa de distancias, etc. El sector de los láseres sigue progresando a ritmo sostenido: construcción de láseres ultrapotentes[IV] (estudio de la fusión nuclear y de la interacción con la materia), de láseres que producen impulsos muy breves (estudio de reacciones químicas), de láseres compactos que emiten en el azul[V], de láseres de rayos X,[VI] etcétera.

interferencia constructiva

+

=

interferencia destructiva

+

=

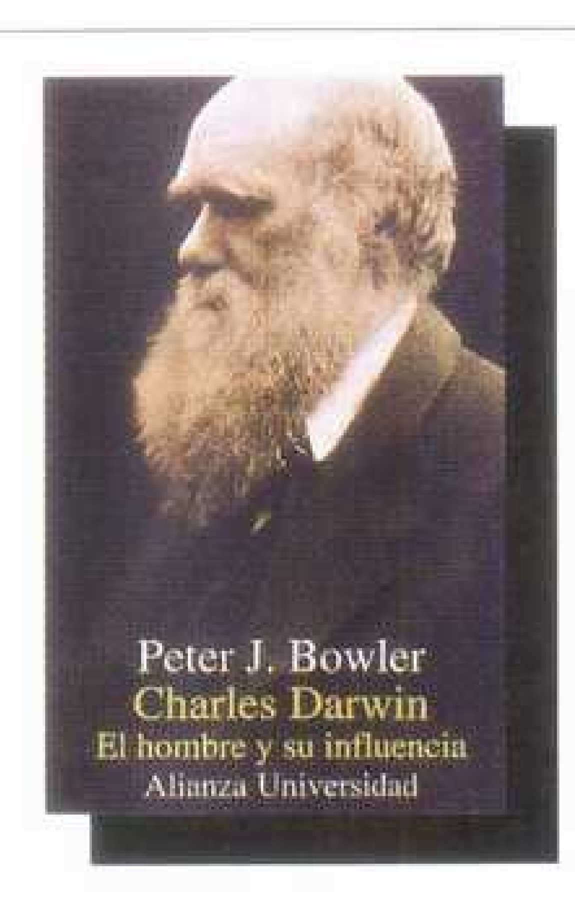
¿Puede la luz empujar un objeto?

La luz transporta energía y cantidad de movimiento, lo cual es fácil de comprender si se piensa en términos de fotones, y tiene, por lo tanto, propiedades mecánicas. La luz que incide sobre una superficie ejerce sobre ella una presión, llamada presión de radiación. Si la intensidad del haz luminoso no es excesivamente elevada, la presión de radiación es demasiado débil para poder empujar un objeto de tamaño macroscópico. No obstante, los físicos saben controlar con gran precisión la posición y la velocidad de pequeñas nubes de átomos por medio de «trampas» luminosas. Estos dispositivos consisten en campos magnéticos y en haces láser cuya frecuencia luminosa está finamente ajustada a fin de explotar lo mejor posible los fenómenos de absorción y emisión de fotones por los átomos.[VII] Se logra así frenar los átomos hasta su casi total inmovilización. También se logra enfriarlos hasta temperaturas extremadamente bajas (unas pocas milmillonésimas de grado por encima del cero absoluto en los experimentos más recientes). Así se logró obtener, en 1995, una condensación muy especial de la materia prevista hace mucho tiempo por el físico indio Satyendranath Bose y por Einstein.[VIII]

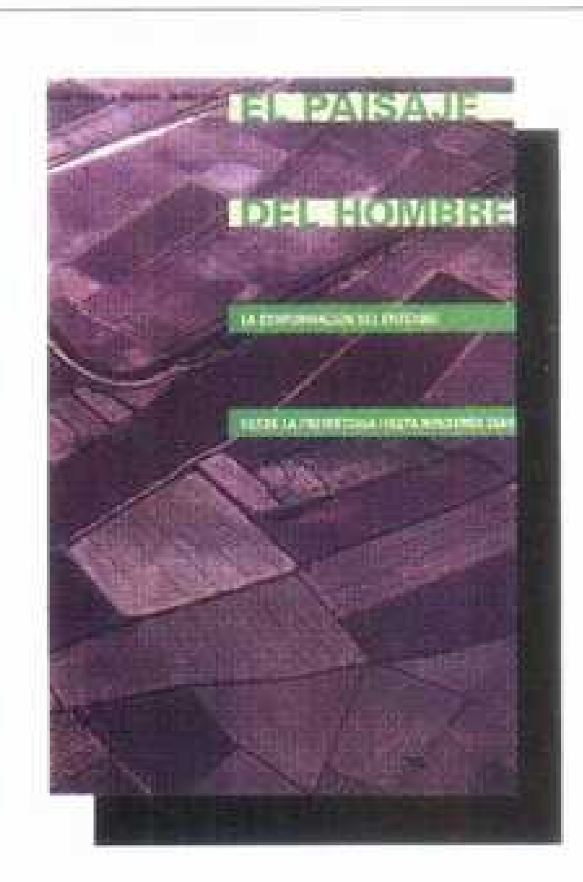
¿Es mejor la luz que el teléfono?

Los gestos, la lectura, los semáforos, toda forma de comunicación visual se basa en la luz. Pero hay realizaciones más modernas: las telecomunicaciones por fibra óptica, un campo en pleno desarrollo. El principio en que se basan consiste en codificar la información a transmitir en forma de señales luminosas, que luego se hacen viajar por fibras hechas con un material que absorbe poco la luz. Esta técnica de comunicación presenta dos ventajas principales: la muy alta frecuencia de las ondas luminosas (unos 10^{15} hertzios) de las ondas luminosas (el flujo de información está limitado por la frecuencia de la onda portadora) y la relativamente débil atenuación de las señales luminosas al propagarse por las fibras. ■









PETER J. BOWLER

CHARLES DARWIN EL HOMBRE Y SU INFLUENCIA

Alianza Editorial, Madrid, 1995, 2.500 ptas.

Ésta no es una biografía de Darwin en el sentido convencional. Aunque he trabajado muchos años en la historia del evolucionismo, nunca me he especializado en el estudio del propio Darwin y no puedo esperar competir con miembros de la «industria Darwin» en su terreno. El acceso a los trabajos de Darwin ha generado la posibilidad de una nueva biografía y yo espero sinceramente que tal biografía se produzca pronto. Pero en lugar de tratar de alcanzar a aquellos especialistas que disponen de un conocimiento de los escritos de Darwin mucho más detallado del que yo nunca lograré, he tomado otro rumbo. Una biografía realmente detallada del tenor que ahora se ha hecho posible tiene necesariamente que ser un volumen enorme más allá del alcance de muchos no especialistas. Entre tanto, creo que hay lugar para un libro con un enfoque distinto —una biografía que toma en cuenta el minucioso trabajo especializado ahora disponible—, aunque escrita a un nivel que permitirá a los lectores y estudiosos corrientes lograr captar los problemas con que se enfrentan los historiadores especialistas.

Si no soy un experto en el propio Darwin, al menos he dedicado una parte significativa de mi vida a entender el impacto de su teoría. La industria darwiniana ha derrocado buena parte de los mitos que rodean su obra, pero hay otra línea de investigación que no ha dejado tampoco de arrojar una luz distinta sobre el impacto del evolucionismo. Los historiadores están empezando a pensar que la imagen convencional de la influencia de Darwin en el desarrollo del pensamiento moderno está bastante distorsionada. Darwin no fue la única persona que exploró el concepto de evolución a comienzos del siglo XIX, ni su teoría de la selección natural dominó el pensamiento evolucionista del último periodo victoriano. El papel desempeñado por Darwin en el desarrollo del evolucionismo necesita, por tanto, reinterpretarse a la luz de la investigación histórica moderna. Este libro se sirve de una panorámica de su vida y de su obra como medio para animar al lector a pensar más minuciosamente cómo debemos interpretar a un hombre cuyas ideas han sido empleadas y mal empleadas de tantos modos distintos, tanto dentro como fuera de las ciencias.

Peter J. Bowler ■

MANUEL CALVO HERNANDO

LA CIENCIA EN EL TERCER MILENIO

McGraw-Hill/Interamericana de España, Madrid, 1995, 1.715 ptas.

Manuel Calvo Hernando, presidente de la Asociación Española de Periodismo Científico, acaba de publicar este libro que es una recopilación de su dedicación a la divulgación de la ciencia y de la técnica, y nos ofrece temas para la información y la reflexión sobre el Tercer Milenio.

Reproducimos por su interés el prólogo de Federico Mayor Zaragoza (Director General de la UNESCO):

«En las páginas de este libro de amena erudición sobre el Tercer Milenio, Manuel Calvo Hernando nos invita a examinar las tendencias y los artefactos que modulan ya el perfil del siglo XXI. Dos rasgos sobresalen de la panoplia de fuerzas, hallazgos e innovaciones que nos presenta: la aceleración del cambio tecnológico y la mundialización de los conflictos.

»Entre el descubrimiento de los principios físico-químicos que hicieron posible la fotografía en color y su aplicación comercial, transcurrieron varias décadas. Entre la creación del primer circuito integrado y el desembarco del ordenador personal en las estanterías de los grandes almacenes, mediaron apenas unos años. En modo alguno es descabellado pensar que el plazo que separa el hallazgo científico de la aplicación y difusión masiva de sus derivados seguirá acortándose. Esto contribuye a acelerar cada vez más la transformación de estos *medios* técnicos de que el hombre dispone para modificar su entorno, con lo cual el proceso se retroalimenta.

»He subrayado la palabra *medios* porque en ella está una de las claves del problema. El hombre del siglo XX ha concentrado toda su atención en el carácter instrumental y utilitario de la ciencia, desdeñando las consideraciones más graves acerca de sus fines. En gran medida, la sociedad contemporánea rechaza todavía las preguntas últimas, no desea interrogarse sobre el sentido y la trascendencia de lo que se emprende. Ya a principios de siglo, Ortega y Gasset señalaba esta cualidad y proclamaba la necesidad de postular, frente a una cultura de los medios, otra de postrimerías; una cosmovisión basada en valores nítidamente definidos, que tuvieran, en última instancia, una base ontológica sólida.

»Éste es quizás el desafío más importante que encierra el porvenir. Ante la complejidad técnica que el hombre ha creado, se impone una higiene del pensamiento y las emociones que le permita ponerse en claro consigo mismo y enfrentarse al mundo con inéditos entusiasmos, con un renovado sentido de la ética y la solidaridad.

»El segundo aspecto de la situación actual —que sin duda se prolongará en el futuro inmediato— aparece estrechamente vinculado al anterior. El desarrollo impetuoso de la técnica ha unificado el planeta y homogeneizado las culturas en un grado inimaginable hace sólo unas pocas décadas. Este hecho novedoso de la civilización planetaria —y su corolario: la interdependencia de todos los hombres y todas las sociedades— conlleva la necesidad de replantearse los problemas y hacer frente a las amenazas mediante una estrategia global.

»El deterioro medioambiental, la guerra y la crisis económica; la

ignorancia y la miseria; la superpoblación y la migración caótica, no sólo amenazan hoy a los países del Tercer Mundo. La sequía que devasta una aldea africana o el maremoto que inunda una ciudad de Asia ponen en peligro la libertad y la prosperidad de los vecinos de Londres o de Buenos Aires. Y la misma ecuación es válida en sentido contrario. En este contexto, adquiere una resonancia aún más dramática la admonición de John Donne. Nadie es una isla. El sufrimiento y la muerte de cualquier hombre nos empobrece y humilla a todos.

»La interrelación entre los problemas y el resto de las fuerzas que prefiguran ya el carácter de la sociedad y la cultura mundial del siglo próximo aparece explícita con gran vigor en las páginas de este libro. Su autor ha compilado una obra capaz de transmitir alternativamente escalofríos premonitorios o jubilosa esperanza. Pero la concluye con un colofón de lucidez y moderado optimismo. Los problemas son ingentes, pero también los recursos y las posibilidades lo son. Todo depende, en suma, del hombre, de su voluntad de renovación ética, de su capacidad de amor.

»Las herramientas intelectuales que en el pasado servían para interpretar la realidad han quedado obsoletas en esta coyuntura. Hay que *inventar* el porvenir. Con imaginación, audacia y entrega superiores a cuanto se haya visto nunca. La alternativa es simple: o se hace así o la civilización y el mundo mismo que conocemos corren el riesgo de desaparecer. El autor nos resume los datos del problema y nos deja solos ante la pavorosa aventura: en el umbral de una civilización emergente, donde puede escribirse una nueva página de cultura y de paz, pero donde el hombre estará expuesto también a los mayores peligros jamás imaginados.

»Por su larga y apasionada dedicación al periodismo científico, Manuel Calvo Hernando está en posición privilegiada para intentar vislumbrar el rostro del porvenir inmediato y descifrar los vectores que determinarán el curso de la civilización en el próximo siglo. En este libro lo consigue con objetividad y brillantez.»

Federico Mayor Zaragoza ■
Director General de la UNESCO

GEOFFREY Y SUSAN JELLICOE

EL PAISAJE DEL HOMBRE. LA CONFORMACIÓN DEL ENTORNO

Gustavo Gili. Barcelona, 1995. 5.800 ptas.

Todo paisaje es creación del hombre, escribió una vez Oskar Kokoschka, apostillando que sólo la visión humana permite saber qué es en realidad el mundo. Este libro del matrimonio Jellicoe, presentado en una edición cuidada y de bella factura, ilustra la verdad de Kokoschka.

La obra se propone ofrecer una visión global del paisaje diseñado a lo largo de la historia, desde la microescala del jardín doméstico, hasta la macroescala del espacio regional. Consta de dos partes. La primera, dividida en diecisiete secciones, abarca desde el neolítico hasta finales del siglo XVII. La segunda parte, con once secciones, está dedicada a la evolución del paisaje moderno. Cierra el trabajo un breve epílogo, una selección bibliográfica, y un útil índice onomástico y de topónimos.

Las diferentes secciones de la obra tienen una estructura fija. Se inician con dos páginas introductorias, con párrafos numerados al origen, que versan respectivamente sobre medio físico, historia social, filosofía, expresión, arquitectura y paisaje. A esta introducción de carácter histórico y analítico sigue el estudio de casos, combinando texto e imágenes. La labor descriptiva está apoyada en una amplia colección de mapas, planos y fotografías, que totalizan 750 ilustraciones. La selección de ejemplos es generosa en la cobertura geográfica: desde los intimistas jardines japoneses, hasta los impresionantes paisajes andinos, el lector puede repasar la huella de las principales civilizaciones. La calidad de las ilustraciones, todas ellas en blanco y negro, es excelente, y en general el aparato gráfico constituye uno de los grandes atractivos de esta publicación.

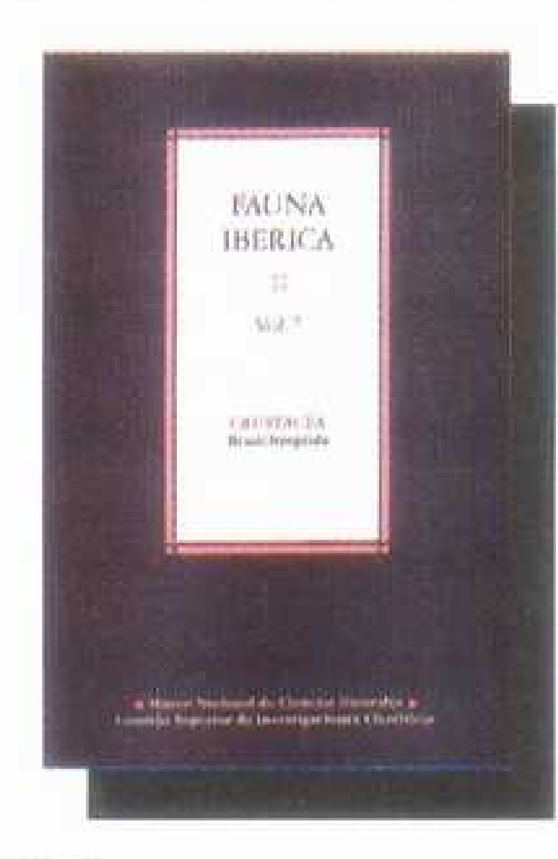
El desafío analítico de interpretar el paisaje antrópico y su diseño en un periodo tan largo, y para todo el mundo, quitaría el sueño a cualquiera. La simple tarea narrativa es sencillamente colosal. Los autores salen bastante bien parados del empeño. Pese a la rigidez de su estructura, el libro tiene un atractivo tono personal, y en bastantes secciones ofrece una brillante combinación de descripción de casos e interpretación. La labor de síntesis es vigorosa.

Geoffrey y Susan Jellicoe son arquitectos y urbanistas. Por cierto muy reputados: sir Geoffrey Jellicoe es presidente honorario de la Federación internacional de arquitectos de paisaje. La profesión se hace notar tanto en la cronología adoptada como en la selección temática. Los autores privilegian de modo general la jardinería paisajística, la arquitectura y los paisajes urbanos. La opción es legítima, pero discutible. Los arrozales irrigados del sudeste asiático, o los viñedos en bancales típicos del Mediterráneo, constituyen ejemplos característicos de paisajes antrópicos tan diseñados como cualquier jardín, y su creación y mantenimiento requiere parecidas dosis de trabajo. Por añadidura, los ejemplos citados han sido el escenario vital, el paisaje cotidiano, para millones de hombres a lo largo de cientos de años. Significativamente, los Jellicoe han escogido el año 1700 como tránsito entre los paisajes tradicionales y el paisaje moderno. La fecha viene a coincidir con la muerte de André Le Nôtre, el gran arquitecto paisajista francés que creó los jardines de Versalles. Toda división cronológica es un tanto arbitraria, pero ésta lo es bastante. La obra de Le Nôtre constituye uno de los puntos culminantes de la jardinería del Barroco, pero es difícil aceptar que exista alguna ruptura en el diseño paisajístico en torno a 1700. De hecho, la Europa del siglo XVIII va a estar atiborrada de jardines barrocos y rococó. Por lo demás, resulta obvio que el paisaje no puede reducirse a la jardinería artística. Un geógrafo o un historiador del paisaje podrían sentirse incómodos con la selección de contenidos, pero está claro que estamos ante una obra realizada desde el punto de vista de la arquitectura paisajística.

Si el punto de vista es selectivo, también lo son las preferencias de los autores. Las creaciones italianas del Renacimiento y el Barroco reciben un tratamiento merecidamente amplio (24 páginas). La arquitectura paisajística francesa de los siglos XVI y XVII también es objeto de una muy generosa atención (una sección entera de 14 páginas). Sin embargo, las realizaciones contemporáneas en España, Portugal, Inglaterra, los Países Bajos, Austria y todo el Imperio Germánico se despachan en diez páginas en total. Si provocativa es la selección de ejemplos (en el caso de España se limita a los jardines del Alcázar de Sevilla), peor resulta la amalgama en una única sección de tradiciones paisajísticas tan dispares.

La filosofía de los autores es una suerte de humanismo teñido de ecologismo. Conciben la buena realización paisajística como una síntesis de arquitectura y sensibilidad respecto al entorno natural. Su lectura del paisaje moderno está sesgada en consecuencia: el diseño paisajístico británico y escandinavo está muy bien estudiado. Otras tradiciones modernas, en cambio, resultan preteridas. Pero es bien cierto que toda síntesis entraña una fuerte selección, y toda selección es a la postre personal. La que aquí comentamos es fruto de un trabajo sensible y erudito, y resultará atractiva para numerosos lectores.

Luis Urteaga ■



MIGUEL ALONSO
FAUNA IBÉRICA
CLASE *BRANCHIOPODA*
Consejo Superior de Investigación y Ciencia. Madrid. 1996. 5.000 ptas.

Los *Branchiopoda* son un grupo de crustáceos muy primitivo (del Devónico o incluso anteriores) y extremadamente heterogéneo. Su nivel taxonómico ha sido de clase o de subclase según el tratamiento otorgado a las categorías más altas dentro de los *Crustacea*. El grupo incluye formas pequeñas (los mayores de la fauna actual son los *Notostraca*, que pueden llegar a 70 mm). La mayoría viven en aguas epicontinentales. Son cosmopolitas.

La clasificación de los *Branchiopoda* es difícil debido precisamente a su antigüedad. Muchos de los caracteres que podrían haber sido unificadores se han perdido; de hecho, las diferencias entre los taxones que integran el grupo son más evidentes que las afinidades. Calman (1909) agrupa a los *Branchiopoda* (taxon establecido por Latreille aproximadamente un siglo antes) en cuatro órdenes: *Anostraca, Conchostraca, Notostraca* y *Cladocera*. Esta clasificación respondía en realidad a una variante, con pequeñas modificaciones, de la ya realizada por G.O. Sars en 1890. De los órdenes citados, el de los *Cladocera* ha sido el más discutido debido a su gran heterogeneidad. Fryer (1987), en un concienzudo trabajo propone una nueva clasificación basada en los criterios de G.O. Sars (1890) para los *Cladocera* y en los de Linder (1945) para los *Conchostraca*, que es la que se ha seguido en este libro. Fryer considera 10 órdenes bien diferenciados que constituyen categorías totalmente independientes: dos de ellos (*Spinicaudata* y *Laevicaudata*) eran antigüas tribus de *Conchostraca* (Linder, 1945), cuatro corresponden a subdivisiones de *Cladocera* (*Ctnepoda, Anomopoda, Onychopoda* y *Haplopoda*; Sars, 1890), dos se habían aceptado desde antiguo (*Anostraca* y *Notostraca*) y los otros dos son fósiles (*Lipostraca* y *Kazacharthra*).

Los antecedentes del estudio de los *Branchiopoda* íbero-baleares se remontan a finales del siglo pasado (Bolívar, 1892), pero fueron Celso Arévalo y Luis Pardo (Arévalo, 1916; Pardo, 1932) quienes crearon el ambiente donde se desarrollaría la ciencia limnológica en nuestro país, a cuyo abrigo iba a crecer el conocimiento de estos organismos. El empuje definitivo fue dado por Ramón Margalef con su monografía sobre los crustáceos de las aguas continentales ibéricas (Margalef, 1953). Posteriormente fueron surgiendo numerosas contribuciones de índole regional (citadas a lo largo de la obra) y dos monografías básicas, una de crustáceos planctónicos de embalses (Armengol, 1978) y otra de branquiópodos de lagunas (Alonso, 1985), en las que aparece prácticamente toda la fauna aquí contemplada.

El objetivo principal de esta obra ha sido describir con detalle la morfología, biología y distribución de los *Branchiopoda* de la Península Ibérica y de las islas Baleares, y crear una referencia para estudios posteriores, no sólo en nuestro ámbito regional sino en otros países. Las descripciones son de poblaciones íbero-baleares, todas originales, incluyen la mayor parte de los caracteres morfológicos de interés y se han efectuado sobre individuos de una misma localidad, lo cual elimina prácticamente el riesgo de fabricar «monstruos». Este método, iniciado por David G. Frey para ordenar el caos taxonómico de los *Eurycercidae* (supuestamente cosmopolitas por haber sido estudiados de forma descuidada), podría hacer de los branquiópodos los principales indicadores paleogeográficos y ecológicos si fuese aplicado a escala planetaria.

Aún queda mucho por realizar. Es posible que aparezcan especies nuevas en el ámbito íbero-balear, particularmente en aquellos sistemas susceptibles de ser colonizados por especies exóticas, como son los arrozales. También hay que resolver los problemas de variabilidad intraespecífica, en particular en las especies con ciclomorfosis, que en este libro se han dejado de lado deliberadamente porque deben ser acometidos de forma seria y probablemente con métodos que complementen los estudios morfológicos. Pero quizá lo más estimulante sea comprobar si las especies que aparecen en este libro están nominadas correctamente, ya que en pocas ocasiones se ha tenido la oportunidad de compararlas con material tipo. Esto supone una ardua tarea que en muchos casos implica la búsqueda de locotipos en enclaves remotos, quizás hoy muy transformados o incluso desaparecidos.

La colección de trabajo cuenta con más de 2.000 muestras recogidas en la Península Ibérica y Baleares, representativas tanto de la realidad territorial como ecológica del país. Hay que agradecer la colaboración de varios museos e instituciones por la cesión de material tipo o colecciones de referencia, como el Departamento de Biología de la Universidad de Indiana (colección del Dr. Frey), el Instituto de Morfología Evolutiva y Ecología de la Academia de Ciencias de Rusia (colección del Dr. Smirnov), el Museo G.O. Sars de Oslo, el Departamento de Ecología de la Universidad de Barcelona (colecciones del Dr. Margalef y del Dr. Armengol), el Hornonitrianske Muzeum de Prievidza (colección del Dr. Brtek) y el Prirodonaucen Muzej de Macedonia (colección del Dr. Petkovski).

Finalmente, cabe destacar la excelente contribución del Dr. Damià Jaume a la obra, con la realización de la totalidad de las ilustraciones de los órdenes *Anostraca, Notostraca, Spinicaudata, Ctenopoda* y *Onychopoda*. ■

WILLIAM COOKSON
CAZADORES DE GENES
Editorial Pirámide. Madrid. 1996. 2.100 ptas.

La tarea de la ciencia es una lucha continua por satisfacer la curiosidad innata que los humanos tenemos por conocer cómo funciona el mundo y nosotros mismos. Los científicos son niños que aún insisten en conocer fascinados cómo están organizadas las cosas y cómo funcionan.

En este libro se intenta descubrir el maravilloso funcionamiento del genoma humano, de la totalidad organizada —que es más que la suma de las partes— de nuestros genes y de nuestro DNA.

Gran parte de la obra se dedica a la caza de genes, a incursiones en el alcance desconocido del genoma que permite descubrir las causas de muchas enfermedades humanas. En 14 amenos capítulos se explica la estructura y funciones básicas del DNA, del RNA y de las proteínas, las aventuras intelectuales de los genetistas a través de las conquistas de los cromosomas genéticos y genes, las causas de las enfermedades genéticas monogenéticas, las razones genéticas de que exista el sexo y su evolución, las raíces de las enfermedades genéticas complejas, la potencial caja de Pandora que puede resultar la manipulación genética y los problemas éticos que aparecen con las modernas técnicas moleculares. Sin pronunciarse, el autor informa amplia y precisamente, siendo el producto resultante excelente y atractivo al mismo tiempo. **L.D.** ■

JOHN ALLEN PAULOS
UN MATEMÁTICO LEE EL PERIÓDICO
Tusquets Editores. Barcelona. 1996. 2.300 ptas.

John Allen Paulos ha demostrado ya con sus dos libros anteriores ser un auténtico maestro en convertir las matemáticas en una disciplina atractiva y viva. Con la misma inteligencia, el mismo desenfado y el mismo humor con que nos hizo comprender por qué, si insistimos en permanecer anuméricos, el complejo mundo que nos rodea acabará por escapar a nuestro control, Paulos nos induce ahora a leer «matemáticamente» entre las líneas de un periódico imaginario, rastreando la estrategia que hay detrás de cualquier titular, y a percibir lo que hay de aleatorio en las muchas falacias que se ocultan tras ciertas noticias, ya sean de crímenes, atentados, acontecimientos políticos y económicos, chismes sobre famosos, sectas, partidos de fútbol, riesgos para la salud y muchos otros temas que ocupan la prensa diaria del mundo entero. **S.N.** ■

PUBLICACIONES RECIBIDAS

UNIVERSO, Nº 13
Astronomía y astronáutica, edita Antares, Ciencia y Ediciones, Barcelona, mayo, 1996 (675 ptas.).

EL MÉDICO, Nº 603
Edita Saned, Madrid, 19 de abril, 1996 (350 ptas.).

NATURE, Nº 6.575
Vol. 380, edita Macmillan Magazines Ltd., Londres, 18 de abril, 1996 (£ 4.00).

L'HISTOIRE, Nº 199
Edita la Société d'éditions scientifiques, París, Francia, mayo, 1996 (36 F).

SCIENCE, Nº 5.261
Vol. 272, edita American Association for the Advancement of Science, Danbury, EEUU, 26 de abril, 1996 ($ 7.00).

INTEGRAL, Nº 197
Edita Oasis, Barcelona, mayo, 1996 (500 ptas.).

UNE, Nº 95
Edita Aenor, Asociación española de Normalización y certificación, Madrid, marzo, 1996 (1.100 ptas.).

REDES LAN, Nº 90
Edita Business publications España, Madrid, marzo, 1996 (800 ptas.).

REVISTA DE TELECOMUNICACIONES DE ALCATEL
Edita Alcatel, 1er trimestre de 1996, Madrid, 1996 (gratuita).

ECOLOGÍA INTERNACIONAL, Nº 20
Edita Maj Comunicación, Madrid, marzo, 1996 (400 ptas.).

TRIBUNA DE ASTRONOMÍA, Nº 125
Edita Equipo Sirius, Madrid, mayo, 1996 (485 ptas.).

IBÉRICA, Nº 383
Edita la Associació de Pedagogia de les Ciències, Barcelona, febrero, 1996 (410 ptas.).

BIO, Nº 6
Edita el Colegio Oficial de Biólogos, Madrid, enero-abril, 1996 (150 ptas.)

POLÍTICA CIENTÍFICA, Nº 45
Edita Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (gratuita).

MUNDO ELECTRÓNICO, Nº 266
Edita Boixareu Editores, Barcelona, abril, 1996 (1.400 ptas.).

CAUCE 2000, Nº 73
Edita el Colegio de Ingenieros de Caminos, canales y puertos, Madrid, enero-febrero, 1996 (750 ptas.).

BOLETÍNEURAL, Nº 4
Boletín de información para las relaciones Europa-Latinoamérica, edita el Servicio Europa Fundación Universidad-Empresa, enero, 1996 (gratuita).

ÚLTIMAS NOTICIAS DEL COSMOS
Hubert Reeves, edita Alianza Editorial, Madrid, 1996 (1.650 ptas.).

EVOLUCIÓN AMBIENTAL
Lynn Margulis y Lorraine Olendzenski (eds.), edita Alianza Editorial, Madrid, 1996 (3.900 ptas.).

LA LUZ: EL AYER, EL HOY Y EL MAÑANA
F. Jaque Rechea y J. García Solé, edita Alianza Editorial, Madrid, 1996 (2.300 ptas.).

ATLAS DE MATEMÁTICAS, 2
Fritz Reinhardt y Heinrich Soeder, edita Alianza Editorial, Madrid, 1996 (3.950 ptas.).

MANUAL PARA LA IMPLANTACIÓN DE UNA GESTIÓN RACIONAL DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL
Edita la Secretaría General Técnica, Centro de publicaciones, Madrid (1.600 ptas.).

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS DE *THE NEW YORK TIMES*
Editado por Richard Flaste, editor del Science Times (EEUU), prólogo de Calvo Hernando, McGraw Hill, Madrid, 1996 (2.845 ptas.).

LA EXPLORACIÓN DE LA TIERRA DESDE EL ESPACIO
Jon Erickson, Universidad de Arkansas (EEUU), edita McGraw Hill, Madrid, 1996 (2.355 ptas.).

FUSIÓN
Robin Herman. Periodista del The New York Times, edita McGraw Hill, Madrid, 1996 (1.615 ptas.).

EN BUSCA DEL INFINITO
Stan Gibilisco, edita McGraw Hill, Madrid, 1996 (1.660 ptas.).

AGENDA

Cytokines in infectious diseases.
Para más información: Instituto Juan March de Estudios e Investigaciones. C/Castelló 77. 28006 Madrid. Tel. (91) 435 42 40. Fax (91) 576 34 20. Del 3-5 junio.

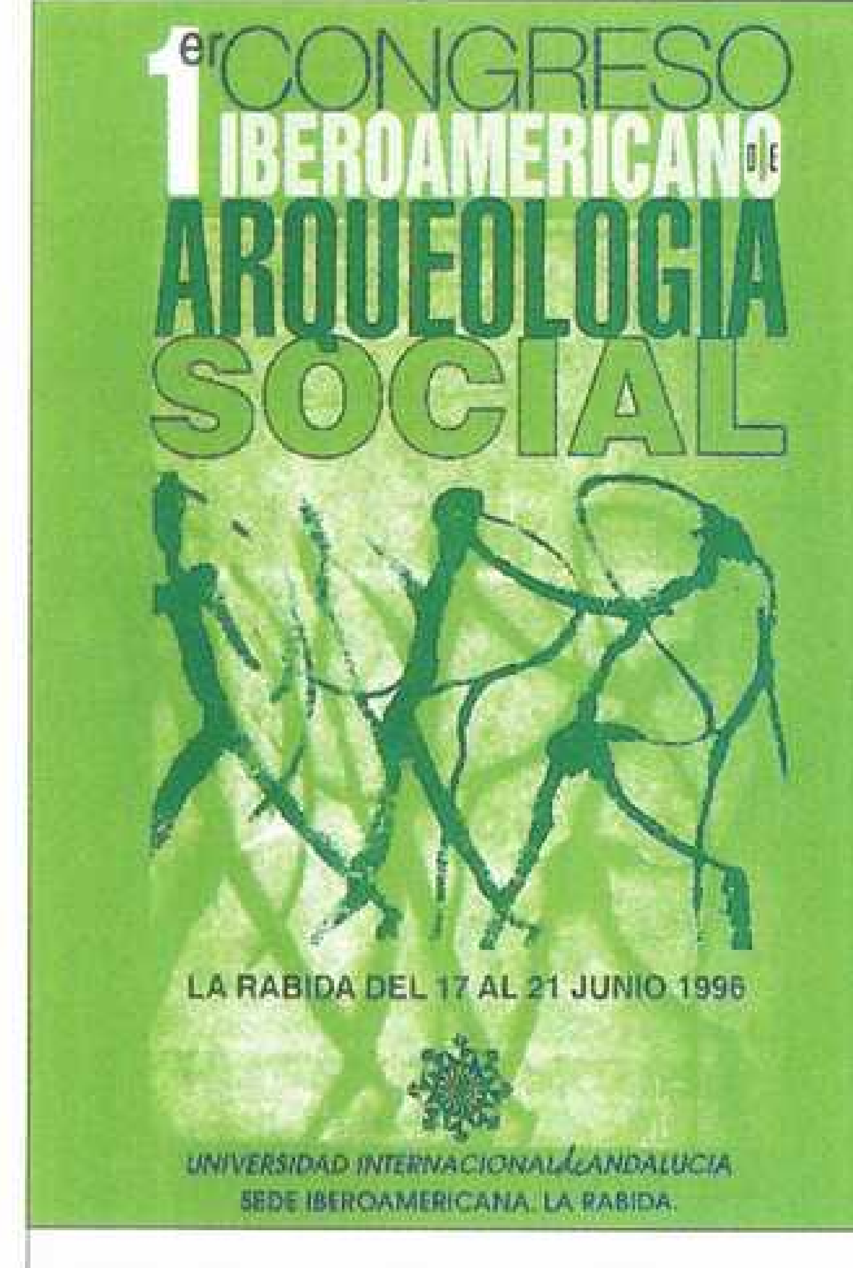
Molecular Biology of skin and skin diseases.
Para más información: Instituto Juan March de Estudios e Investigaciones. C/Castelló 77. 28006 Madrid. Tel. (91) 435 42 40. Fax (91) 576 34 20. Del 17-19 junio.

1er Congreso Iberoamericano de Arqueología Social.
Para más información: Universidad Internacional de Andalucía. Sede Iberoamericana. La Rábida. Paraje La Rábida. 21819 Palos de la Frontera (Huelva). Tel. (959) 35 04 52. Fax (959) 35 01 58. Correo electrónico: UNIARA@UNIARA.UIA.ES
Del 17-21 junio.

Programed cell death in the developing nevous system
Para más información: Instituto Juan March de Estudios e Investigaciones. C/Castelló 77. 28006 Madrid. Tel. (91) 435 42 40. Fax (91) 576 34 20. Del 1-3 julio.

XXVII Curso de capacitación para operadores de instalaciones radiactivas
Para más información: Universidad Autónoma de Barcelona, Depto. de Física, Grupo de Física de las Radiaciones. 08193 Bellaterra (Barcelona) Tels. (93) 581 15 08/ 581 13 64. Del 1-12 de julio.

IV Jornadas Castellano-Leonesas de Enseñanza y Aprendizaje de las matemáticas
Para más información: Centro



de Profesores y Recursos II, Asesoría de Matemáticas. C/Soto s/n. Tel. (983) 26 06 50. Fax (983) 26 06 66. Del 10-12 septiembre.

Expotrónica, Salón Internacional de equipos y Componentes Electrónicos.
Para más información: Fira de Barcelona, Avda. Reina Mª Cristina, s/n. 08004 Barcelona, Tel. (93) 423 31 01. Fax (93) 325 52 80. Del 30 septiembre- 4 octubre.

Curso sobre modelización numérica de problemas dinámicos en geomateriales.
Para más información: Centro de Estudios y Experimentación de Obras públicas (CEDEX). Gabinete de Formación y Documentación. C/Alfonso XII, 3. 28014 Madrid. Tels. (919) 335 73 07/335 73 56. Fax (91) 335 73 07. Del 21-25 octubre.

Eurosurfas, Salón sobre el Tratamiento de superficies.
Para más información: Fira de Barcelona. Avda. R. Mª Cristina s/n. 08004 Barcelona. Tel. (93) 423 31 01. Fáx (93) 325 52 80. Del 20-25 octubre.

SYSTEMS 96, 15 Salón Internacional y Congreso de la Tecnología de Información y la Telecomunicación.
GHM Gesellschaft für Handwerksausstellungen und-messen mbH. Theresienhöle 14. D-80339 München. Tel. (49 89) 519 80 Fax (49 89) 519 81 42. Del 21-25 octubre.

Curso sobre patología geotécnica en obras hidráulicas y su tratamiento.
Para más información: Centro de Estudios y Experimentación de Obras públicas (CEDEX). Gabinete de Formación y Documentación. C/Alfonso XII, 3. 28014 Madrid. Tels. (91) 335 73 07/335 73 56. Fax (91) 335 73 07. Del 21-25 octubre.

VI Congreso Iberoamericano de residuos sólidos.
IFEMA. Parque Ferial Juan Carlos I. Apdo. de Correos 67.067. 28067 Madrid. Tel. (91) 722 50 90. Fax (91) 722 57 93. Del 9-21 noviembre.

Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras.
Para más información: Centro de Estudios y Experimentación de Obras públicas (CEDEX). Gabinete de Formación y Documentación. C/Alfonso XII, 3. 28014 Madrid. Tel. (919) 335 73 07/335 73 56. Fax (91) 335 73 07. Del 18-29 noviembre.

I Semana Internacional del Urbanismo y del Medio Ambiente.
Feria de Madrid. Parque ferial Juan Carlos I. Apdo. de Correos 67.067. 28067 Madrid. Tel (91) 722 50 90. Fax (91) 722 57 93. Del 19-22 noviembre.

III Congreso Nacional del Medio Ambiente
Organiza el Colegio Oficial de Físicos. Alonso Martínez, 6, 6º B. 28004 Madrid. Tel. (91)308 55 39. Del 25-29 noviembre.

VIII Congreso Latinoamericano de láser en medicina y cirugía.
Caribe Internacional Tours. Paseo de La Habana, 56, 1º A. 28036 Madrid. Tel. (91) 563 06 11/ 563 06 71. Fax (91) 563 59 49. Del 25-29 noviembre.

27 Congreso de la Asociación Catalana de Oftalmología.
Hotel Feria Palace, organiza Catalana de Congresos. C/Sant Pere Mitjà, 17. 08009 Barcelona. Tel. (93) 319 09 55. Fax (93) 319 18 53. Del 12-14 diciembre.

IV Encuentros de Historia de la Ciencia y de la Técnica.
Escuela Politécnica Superior. Unidad Docente del Departamento de Física Aplicada de la Universidad Politécnica de Valencia. Área de Historia de la Ciencia. Avda. Viaducte, 1. 03800 Alcoi. Tel. (96) 652 84 41. Fax (96) 652 84 09. Del 13-15 diciembre.

• SECRETARÍA DE ESTADO DE UNIVERSIDADES E INVESTIGACIÓN.
Ayudas para el desarrollo y funcionamiento de las oficinas de transferencia de resultados de investigación (OTRI), en el marco del Programa Nacional de Fomento de la Articulación del Sistema Ciencia-Tecnología-Industria. Dirigidas a entidades sin ánimo de lucro.
Requisitos: los directores o responsables de las unidades de interfaz de los entes públicos y privados sin ánimo de lucro con finalidad investigadora.
Plazos: el plazo de presentación de solicitudes queda abierto hasta la publicación de una nueva convocatoria.

• SECRETARÍA DE ESTADO DE UNIVERSIDADES E INVESTIGACIÓN.
Proyectos cooperativos y proyectos concertados de investigación y desarrollo. Ayudas o subvenciones destinadas a cumplir los objetivos de los proyectos integrados DESAT (Proyecto integrado sobre Estudios y Desarrollos Específicos para las Siguientes Generaciones de Satélites Hispasat) y PITER (Proyecto Integrado de Tecnología de la Rehabilitación). Bases generales BOE del 22 de octubre de 1995.
Requisitos: empresas.
Plazos: 1 de octubre de 1996.

• SECRETARÍA DE ESTADO DE UNIVERSIDADES E INVESTIGACIÓN.
Proyectos de estímulo a la transferencia de resultados de investigación. Ayudas o subvenciones destinadas a cumplir los objetivos de los proyectos integrados DESAT y PITER. Bases generales BOE del 13 de junio de 1995.
Requisitos: centros públicos de investigación y centros tecnológicos.
Plazos: no se especifica plazos de presentación de solicitudes.

• MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA.
Ayudas o subvenciones para proyectos de investigación y desarrollo tecnológico en el área de salud, en el marco del Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico.
Requisitos: investigadores, personas físicas con capacidad investigadora encuadradas en entes españoles, públicos o privados sin finalidad de lucro.
Plazos: aunque el plazo finaliza el 31 de mayo de 1996, queda abierto hasta nueva convocatoria para proyectos de cofinanciación europeos.

• CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN, UNIVERSIDADES E INVESTIGACIÓN DEL PAÍS VASCO.
Ayudas para la realización de congresos, así como reuniones científicas, cursos o seminarios.
Requisitos: departamentos de la UPV/EHU, departamentos de las universidades no públicas con sede en el País Vasco, entes tutelados de investigación, entidades o instituciones de enseñanza superior y/o investigación y miembros con residencia civil en esa comunidad.
Plazos: 28 de junio de 1996.



• CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN, UNIVERSIDADES E INVESTIGACIÓN DEL PAÍS VASCO.
Programas de perfeccionamiento y movilidad del personal investigador.
Requisitos: investigadores.
Plazos: 28 de octubre de 1996. Las solicitudes se presentarán dos meses antes del inicio de la visita.

• CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN, UNIVERSIDADES E INVESTIGACIÓN DEL PAÍS VASCO.
Bolsas para desplazamiento y asistencia a congresos científicos y técnicos.
Cuantía: 200.000 pesetas como máximo, excepto para los congresos transoceánicos, para los cuales el máximo será 300.000 pesetas.
Requisitos: investigadores miembros de las plantillas docentes y/o investigadoras de la UPV o de los centros adscritos a ésta; ser miembro de las plantillas investigadoras de los entes tutelados de investigación de esa comunidad, o ser becario pre o posdoctoral.
Plazos: 10 de julio de 1996.

• CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN, UNIVERSIDADES E INVESTIGACIÓN DEL PAÍS VASCO.
Ayudas para acciones especiales de investigación.
Requisitos: investigadores adscritos a universidades públicas o privada o entes tutelados de investigación radicados en esa comunidad autónoma que estén en posesión del título de doctor.
Plazos: 15 de octubre de 1996.

• CONSEJERÍA DE SERVICIOS SOCIALES DEL PRINCIPADO DE ASTURIAS.
Subvenciones a entidades e instituciones sin ánimo de lucro para la realización de congresos, simposios y reuniones científicas, en materia de salud, que se celebren en esa comunidad autónoma durante 1996.
Cuantía de la subvención: no superará las 25.000 pesetas por cada entidad solicitante.
Requisitos: entidades sin ánimo de lucro legalmente constituidas que lleven a cabo la realización de congresos, simposios, jornadas y reuniones científicas, en materia de interés sanitario.
Plazos: 14 de octubre de 1996.

• DIRECCIÓN GENERAL DE SALUD DE NAVARRA
Bolsas de viaje para asistencia a cursos y reuniones científicas en materia de salud que vayan a realizarse durante 1996.
Cuantía: una asignación máxima diaria de 7.000 pesetas en concepto de alojamiento y manutención. Además se resolverá, caso por caso, la financiación parcial o total de los gastos de viaje y de matrícula.
Requisitos: profesionales sanitarios que formen parte de la plantilla o se encuentren en periodo de formación en centros sanitarios y universitarios, públicos o privados sin fin de lucro, ubicados en esa comunidad autónoma.
Plazos: 30 de septiembre de 1996.

III CONGRESO INTERNACIONAL DE CAMINERIA HISPANICA
LA CAMINERIA: CLAVE DEL DESARROLLO DE LAS CIUDADES EN HISPANOAMERICA
CONVOCATORIA
DEL 15 AL 20 DE JULIO DE 1996
MORELIA (MICHOACAN - MEXICO)

• COMISIONADO PARA UNIVERSIDADES E INVESTIGACIÓN DE LA GENERALITAT DE CATALUNYA.
Via Laietana 33, 6º. 08003 Barcelona. Tel. (93) 310 22 63. Fax (93) 310 73 22.
Becas que están englobadas en el Plan de Investigación de Cataluña 1993-1996. Las convocatorias están agrupadas por programas, desde la formación y el fomento del espíritu científico hasta la promoción de la investigación o la innovación tecnológica.

• Becas predoctorales para la formación de investigadores en el programa de fomento general y en determinadas áreas prioritarias del Plan de Investigación.
Cuantía de la beca: 145.000 pesetas brutas mensuales. Se podrá solicitar hasta un máximo de tres renovaciones anuales. Si procede, se incluirán las tasas y los precios académicos oficiales de los programas de doctorado en los que esté matriculado el becario. Además, los beneficiarios podrán solicitar bolsas de viaje al extranjero para completar su formación investigadora por un periodo de tres meses cada año, a partir del segundo año de disfrute de la beca.
Requisitos: titulados universitarios de nacionalidad española o ciudadanos de un país comunitario residentes en Cataluña con edad igual o inferior a 35 años, que hayan concluido los estudios de segundo ciclo en el mes de junio de 1993 o posteriormente y estén en posesión del título de licenciado, ingeniero o arquitecto de una escuela superior. La nota mínima del expediente académico de los estudios de primer y segundo ciclo ha de ser igual o superior a 1,25.
Plazos: 4 de octubre de 1996.
Fecha de resolución: antes del 31 de diciembre de 1996.

• Becas y ayudas para la movilidad interregional de investigadores, para investigadores y profesores de las universidades y centros públicos de investigación de Cataluña, para realizar estancias en universidades y centros de investigación de regiones e instituciones que hayan firmado acuerdos de colaboración con Cataluña, en condiciones de reciprocidad por parte de otra administración regional. Las propuestas se pueden referir a todos los ámbitos de las ciencias, las humanidades y la tecnología.
Cuantía de la beca o ayuda: entre 145.000 y 180.000 pesetas brutas mensuales, según el país de destino, para estudios predoctorales; para estudios posdoctorales, entre 195.000 y 255.000 pesetas brutas mensuales. Se dará ayudas para los viajes de ida y vuelta.
Requisitos: estancias entre seis y doce meses, con posibilidad de renovación.
Plazos: 10 de octubre de 1996.
Fecha de concesión: un mes y medio a partir de la presentación de la solicitud.

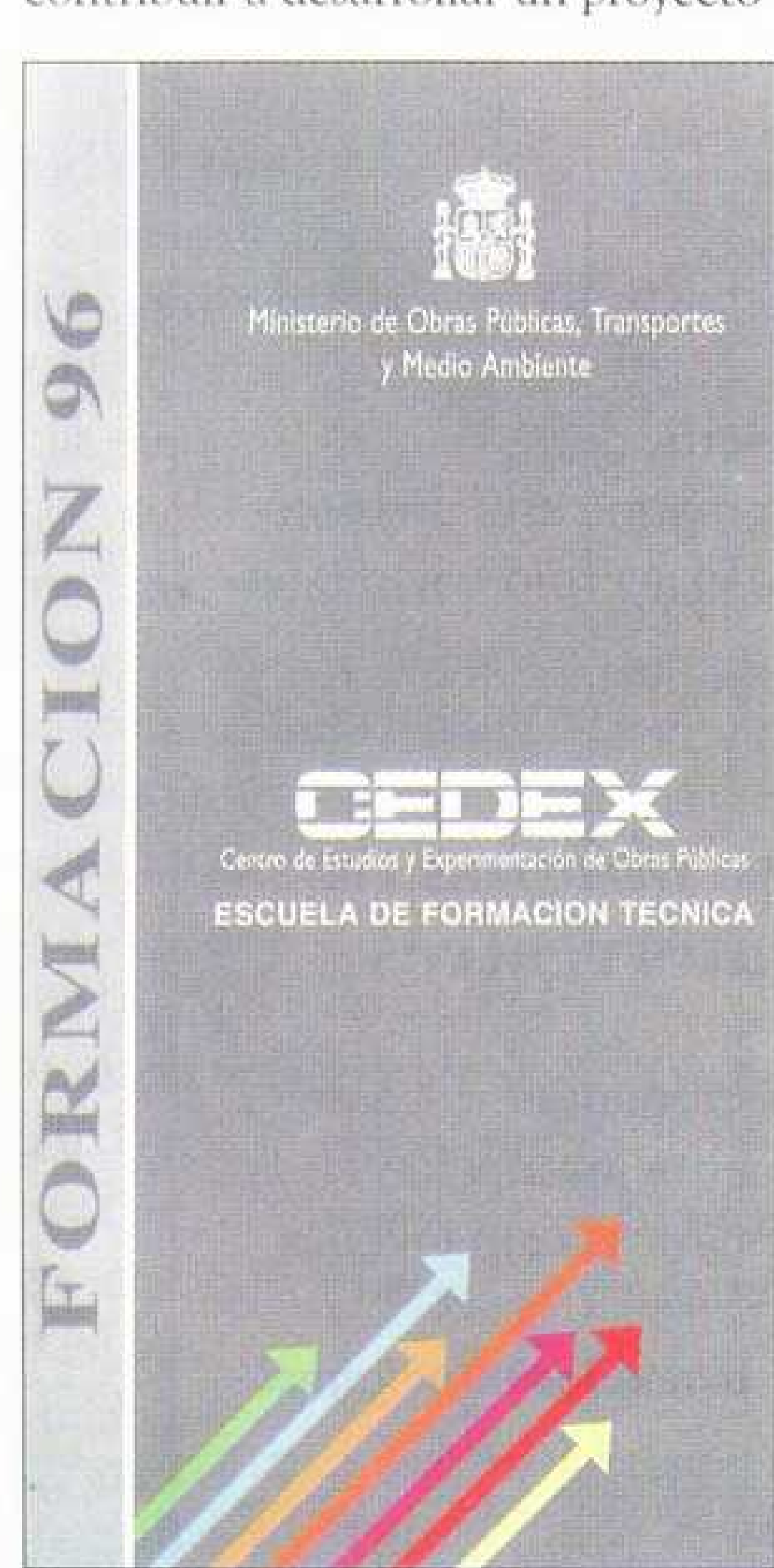
• Ayudas a las universidades catalanas para subvencionar estancias de profesores e investigadores visitantes en sus departamentos o institutos de investigación, con finalidad de docencia o investigación en cualquier materia.
Cuantía de la ayuda: se calculará en función de los méritos del candidato y la duración de la estancia. Para las nuevas ayudas, se incluirá una dotación para el viaje de ida y vuelta.
Requisitos: doctores universitarios extranjeros o españoles no residentes en Cataluña, vinculados de forma permanente y estable a cualquier centro de enseñanza superior y/o investigación de fuera de Cataluña e invitados por un departamento o instituto de investigación de alguna universidad catalana. La solicitud la presentará la institución receptora del visitante. La duración mínima será de cuatro meses, y la máxima, de doce. Se podrá renovar por otros doce.
Plazos: 10 de octubre de 1996.
Fecha de concesión: un mes y medio a partir de la presentación de la solicitud.

• Programa Gaspar de Portolà para estancias de profesores universitarios en la Universidad de California.
Cuantía: 2.500 dólares estadounidenses mensuales y un viaje de ida y vuelta.
Requisitos: doctores profesores ordinarios de universidades catalanas aceptados formalmente por un departamento universitario de la Universidad de California. Estancias entre tres y diez meses.
Plazos: para estancias entre enero y mayo de 1997, hasta el 14 de junio de 1996; para estancias entre junio y diciembre de 1997, hasta el 15 de noviembre de 1996.
Fecha de concesión: para el primer plazo, el 20 de julio de 1996; para el segundo plazo, el 20 de diciembre de 1996.

• Becas posdoctorales en el Massachusetts Institute of Technology (MIT). Se otorgarán seis becas, en el marco del convenio de colaboración entre la Generalitat de Catalunya y el MIT.
Cuantía de la beca: 2.080 dólares estadounidenses mensuales, más viaje de ida y vuelta.
Requisitos: titulados por universidades catalanas que hayan obtenido el título de doctor en los últimos tres años. De seis a doce meses de duración.
Plazos: 15 de octubre de 1996
Fecha de concesión: antes del 31 de diciembre de 1996.

• Ayudas para los gastos de viaje y estancias cortas de profesores e investigadores catalanes en centros de regiones asociadas con Cataluña, con el objeto de establecer colaboraciones diversas: movilidad de investigadores para actividades de docencia e investigación, presentación o preparación de proyectos comunes; preparación de seminarios; preparación de proyectos interregionales de cooperación; asistencia a simposios, seminarios, etcétera.
Cuantía de la ayuda: hasta 400.000 pesetas.
Requisitos: profesores e investigadores de las universidades catalanas y centros públicos de investigación.
Plazos: hasta el 10 de octubre.
Fecha de concesión: un mes y medio a partir de la fecha de presentación de la solicitud.

• Ayudas para viajes y estancias de hasta seis meses a investigadores catalanes que se desplacen a centros de regiones asociadas para contribuir a desarrollar un proyecto de investigación en común, durante un máximo de tres años, con la posibilidad de subvencionar gastos de funcionamiento y pequeño equipamiento.
Cuantía de la ayuda: hasta 2.500.000 pesetas anuales.
Requisitos: profesores e investigadores de las universidades catalanas y centros públicos de investigación.
Plazos: hasta el 10 de octubre de 1996.
Fecha de concesión: un mes y medio a partir de la fecha de presentación de la solicitud.



• Subvenciones a empresas para nuevos proyectos de investigación industrial básica, investigación aplicada y desarrollo tecnológico, para incentivar la innovación tecnológica en las pequeñas y medianas empresas de Cataluña.
Cuantía de la subvención: hasta el 50 % del valor del proyecto para investigación industrial básica, y hasta el 35 % para investigación aplicada y desarrollo tecnológico. El importe máximo no superará los 7,5 millones de pesetas.
Requisitos: pequeñas y medianas empresas con establecimiento productivo en Cataluña.
Fecha de concesión: seis meses a partir de la fecha de presentación de la solicitud.

• Ayudas para empresas de Cataluña que incorporen titulados universitarios de segundo o tercer ciclo para realizar proyectos de investigación y desarrollo llevados a cabo en sus propios departamentos de I+D en Cataluña o en las universidades o centros públicos de investigación de Cataluña mediante un convenio de colaboración.
Cuantía de la ayuda: empresas con domicilio social o establecimiento productivo en Cataluña; personas en posesión de un título universitario de licenciado, ingeniero o doctor posterior al 1 de enero de 1992. La duración será de doce meses, con posibilidad de pedir la renovación una sola vez.
Requisitos: la empresa deberá aportar al contrato la misma cantidad que la Administración. Para licenciados, ingenieros y arquitectos, el contrato será de 2.400.000 pesetas anuales brutas incluida la cuota patronal, con una ayuda de 1.200.000 pesetas; para doctores, de 3.000.000 de pesetas brutas, con una ayuda de 1.500.000 pesetas. El pago se hará a la empresa.
Fecha de concesión: dos meses a partir de la presentación de la solicitud.

• Ayudas para la preparación de proyectos de investigación en medio ambiente, en el marco del acuerdo de colaboración firmado entre el Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Catalunya y la CIRIT, que establece una primera fase de elaboración de proyectos y una segunda de puesta en práctica de proyectos seleccionados. La información relativa a esta convocatoria la proporciona la Dirección General de Promoción y Educación ambiental de la Generalitat de Catalunya. Avda. Diagonal 525. 08029 Barcelona. Tel. (93) 419 30 85.
Cuantía de la ayuda: un máximo de un millón de pesetas por preproyecto.



Requisitos: investigadores o grupos investigadores de las universidades catalanas y centros públicos de investigación.
Plazos y fecha de concesión: según convocatoria que se publicará en el DOGC.

• Ayudas para la organización de ciclos de conferencias y cursos especializados, impartidos por científicos de reconocido prestigio, adscritos a centros de investigación o universidades extranjeras.
Cuantía de la ayuda: 400.000 pesetas como máximo. La CIRIT editará el opúsculo que servirá para la difusión del acto.
Requisitos: investigadores de universidades catalanas, centros adscritos a ellas, centros públicos de investigación o sociedades científicas legalmente constituidas. Las actividades deberán celebrarse durante 1996 y, excepcionalmente, hasta el 15 de marzo de 1997.
Plazos: 31 de octubre de 1996.
Fecha de concesión: un mes a partir de la presentación de la solicitud.

• Ayudas para la creación, desarrollo y consolidación de redes temáticas constituidas por grupos de investigación que trabajan en temas afines y complementarios en diferentes instituciones de Cataluña, para favorecer la existencia de equipos de masa crítica, transdisciplinarios o multidisciplinarios, y su colaboración con grupos de calidad de fuera de Cataluña.
Cuantía de la ayuda: un máximo de 1.500.000 pesetas.
Requisitos: grupos de investigadores de universidades y centros públicos de investigación catalanes.
Plazos: 13 de septiembre de 1996.
Fecha de concesión: segunda quincena de octubre de 1996.

BUSCAR JUGAR ENCONTRAR

Elisabeth Busser
y Gilles Cohen

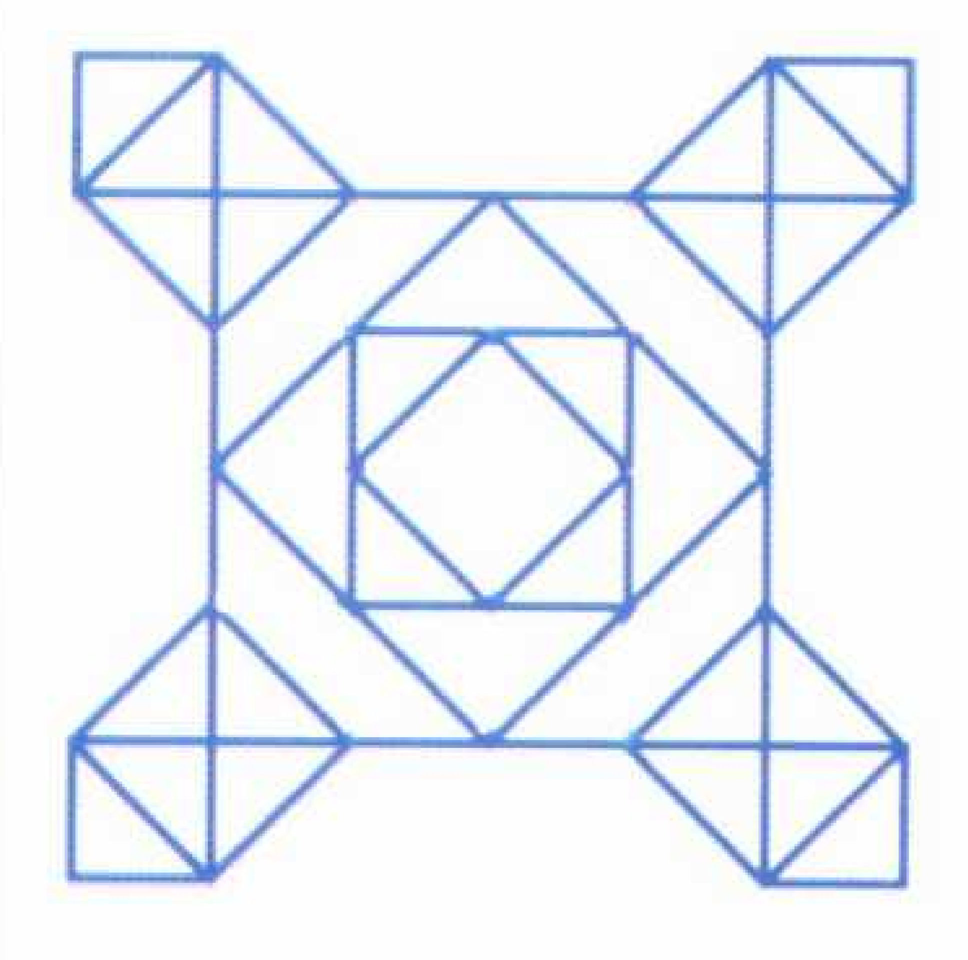
LOS JUEGOS DE LOS LECTORES

1

Agradecemos a los lectores el aliento que nos brindan, pero también el hecho de proponernos nuevas soluciones o nuevos problemas. La rúbrica de este mes está inspirada, directa o indirectamente, por sus cartas.



Euler: el regreso



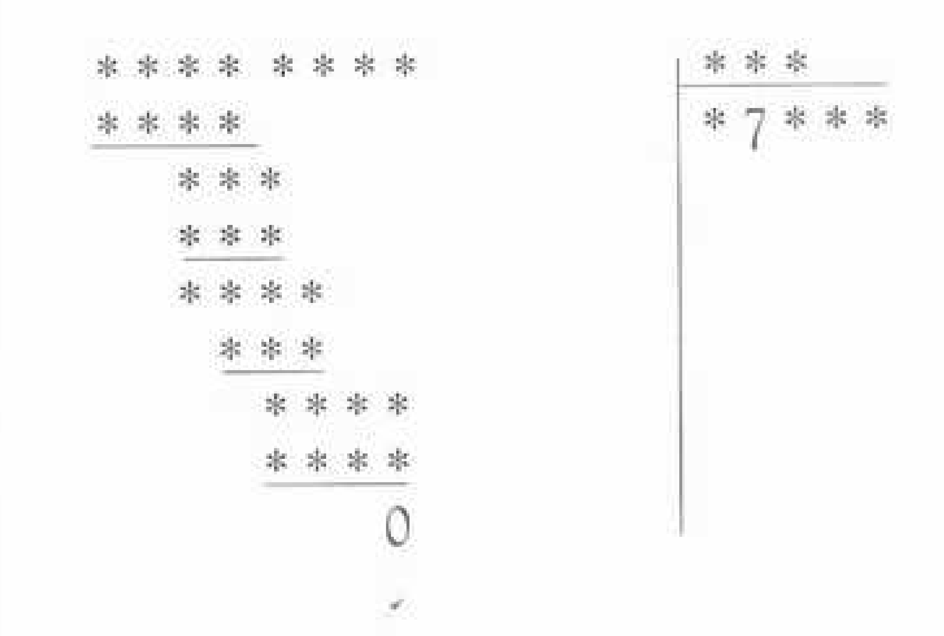
A. Colbert, de Blainville-sur-Orne, juzga demasiado elementales los circuitos a reconstruir en el marco del artículo «Los pasatiempos de Leonhard Euler» y propone otros de su propia cosecha.
Trazar la figura anterior sin levantar el lápiz del papel ni pasar dos veces por el mismo camino.
En una palabra, se trata de encontrar un camino euleriano que permita recorrer la figura. Estamos seguros de que el método de Fleury, descrito por Lucas en la página siguiente, será de alguna utilidad.

B Otra vez 1996

Un país tiene 1.996 ciudades y 4.000 carreteras, cada una de las cuales une dos ciudades.
¿Existe siempre un camino cerrado que no pase por más de 20 ciudades?

C La división de Bruselas

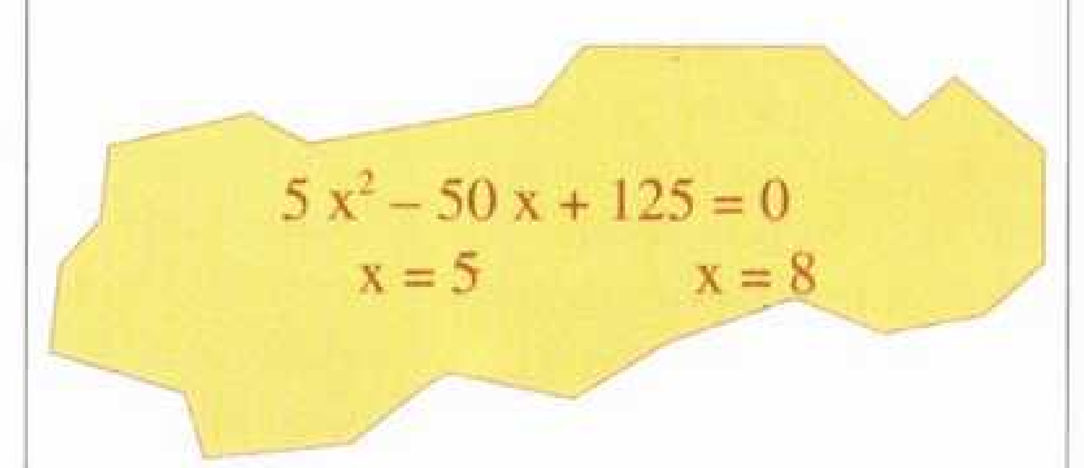
¿Sabéis completar esta división?
En cada etapa, el divisor ha sido multiplicado por la cifra del cociente y el resultado se ha restado de la línea anterior, donde se ha bajado una cifra.



Es F. Wolfcammaerts, de Bruselas, quien propone esta división cifrada, así como el acertijo «marciano» que sigue.

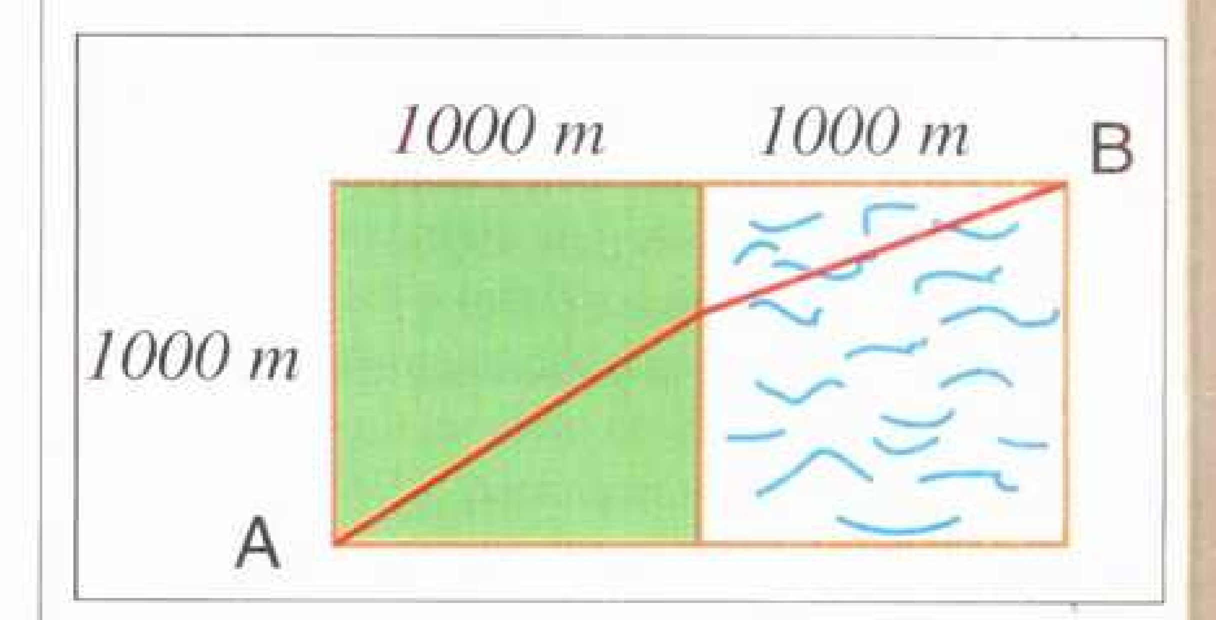
D Un problema de extraterrestres

Una misión de astronautas acaba de descubrir la siguiente inscripción en un manual de matemáticas para jóvenes marcianos:
¿Cuántos dedos tienen los marcianos?



E Descartes y el cow-boy

G. Lyot hace notar que Steinhaus, en el problema del jinete (*Mundo Científico*, nº 165, febrero, 1996) utiliza el principio óptico de la reflexión; propone llevar más lejos la analogía con la óptica aplicando la ley de Descartes al problema siguiente: el protagonista, partiendo de A a caballo, quiere auxiliar a su perro, perdido en B dentro de un pantano, donde el caballo avanza una vez y media más lentamente que en tierra firme.
¿Cuál es el camino más rápido?
(una calculadora puede ser de utilidad)



F Otro problema de buscaminas...

... en el que la física puede desempeñar algún papel.
Un campo en forma de triángulo equilátero, incluidos algunos puntos de su frontera, está minado.
Un desactivador de minas dispone de un detector cuyo radio de acción es igual a la mitad de la altura del triángulo equilátero.
El desactivador parte de un vértice.
¿Cómo debe elegir el recorrido para que el camino que le permite explorar todo el campo sea el más corto posible?

G Casi cuadrado

Ch. Journes, de Saint-Mandé, pregunta ***¿de qué manera se puede pavimentar el rectángulo (casi cuadrado) de lados 176 y 177 por medio de 11 cuadrados?***
Añadamos que, de no conocer las dimensiones de los cuadrados, la tarea es casi imposible. Así pues, os las damos: 99, 78, 77, 57, 43, 41, 34, 25, 21, 16, 9.

2

LAS MATEMÁTICAS RECREATIVAS DE EDOUARD LUCAS (2)

Edouard Lucas ha sido probablemente el autor francés que más ha contribuido al desarrollo de los juegos matemáticos. Sus problemas lúdicos le llevaron a importantes resultados de aritmética. En particular, dio una condición necesaria y suficiente para que un número de Mersenne (de la forma $2^n - 1$) sea primo y también investigó una serie de Fibonacci cuyos elementos se llaman actualmente «números de Lucas» ($u_0 = 1$, $u_1 = 3$, $u_{n+2} = u_{n+1} + u_n$). Excepcionalmente, le dedicamos una segunda página.



A Los caminos eulerianos

La rúbrica del número 164 (enero de 1996) sobre Leonhard Euler se interesaba por los caminos que cabe describir recorriendo una vez y una sola cada una de las líneas de un grafo. Euler había establecido que tal cosa era posible a condición de que dos nudos (o ninguno) fueran de orden impar, es decir, fueran punto de llegada de un número impar de líneas.

Pero, ¿cómo encontrar efectivamente un tal camino?, ¿cómo recorrer todas las líneas de un dibujo sin levantar el lápiz del papel ni pasar dos veces por la misma línea?

He aquí un algoritmo atribuido por Lucas a un tal Fleury.

«Para facilitar la explicación, supondremos que un pincel recorre las líneas de la figura dada, que las va borrando a medida que las recorre, y que la figura tiene dos puntos impares (si todos ellos son pares, basta borrar un fragmento de un camino cualquiera para dar a la figura dos puntos impares). Llamaremos figura reducida a toda figura formada por líneas todavía no borradas. El punto inicial, aquel donde se encuentra en un determinado instante el pincel que borra, y el punto final, aquel donde termina la operación, son necesariamente los nudos impares de la figura reducida. Sólo cuando el pincel pasa por el punto final todos los nudos de la figura son pares. Dado que, durante toda la operación, el número de puntos impares es necesariamente 2 o 0, una figura reducida sólo es imposible de recorrer si se descompone en dos partes no comunicadas entre sí. Llamaremos camino aislante a uno que conecte dos nudos A y B de tal manera que la supresión del camino divida la figura en dos redes mutuamente aisladas. La regla segura y simple para recorrer la red de un solo trazo consiste en no tomar ningún camino aislante mientras haya otros caminos posibles. Esta condición es necesaria y suficiente.[...]

Es inevitable comparar este método con el teorema de Robbins (1939), del que P. Greenberg y M. Loebl dieron en el *Bulletin de l'Association des Professeurs de Mathématiques* (nº 397 de febrero de 1995) una magnífica aplicación:

¿Cómo dar en una ciudad un sentido único a cada calle de tal modo que siempre sea posible trasladarse (en coche) de un punto a otro?

Respuesta: es necesario y suficiente que no haya ninguna calle cuya omisión corte la ciudad en dos partes separadas, es decir, que no haya ningún *camino aislante* en el sentido de Lucas.

C El testamento del nabab

Un nabab deja a sus hijos un cierto número de diamantes de igual valor en las condiciones siguientes:

- el primero coge un diamante y un séptimo de lo que queda;
- el segundo coge dos diamantes y un séptimo de lo que queda;
- el tercero coge tres diamantes y un séptimo de lo que queda;

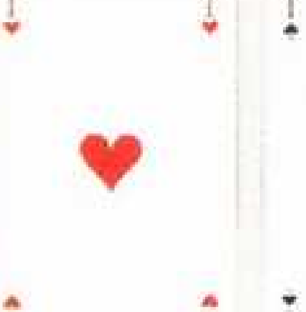
... y así sucesivamente; el último coge su número de diamantes y un séptimo de lo que queda, es decir, nada.

¿Cuántos hijos (y diamantes) tenía el nabab?

Si no acertáis, he aquí una ayuda, dada por Lucas, que a fin de cuentas no es necesaria: después del reparto, todas las partes son iguales. ¿Sabríais demostrarlo?













lugares vacíos

B Las rojas y las negras

En una misma fila y consecutivamente, se colocan seis cartas rojas y seis negras en orden alterno.

¿Cómo conseguir, en seis movimientos y sacando partido de dos lugares vacíos, mover cada vez dos cartas consecutivas sin cambiar su orden y sustituirlas de tal modo que queden reunidas por separado las cartas rojas y las cartas negras?

Variante:

Sustituir «seis» por «siete» en el enunciado anterior: siete cartas rojas, siete cartas negras y siete movimientos.

las soluciones en el próximo número

Inferno persigue a Java

El conocido éxito de Java, el lenguaje que hace vivir las páginas del Web, hace que algunos sueñen con hacerle la competencia directa en su terreno. El intento de AT&T se llamaría Inferno en el Internet. El padre del proyecto es nada menos que el padre de Unix y del lenguaje C, Dennis Ritchie. El objetivo sería que fuese más sencillo y ligero que Java, así como de un acceso más rápido.

Netscape ha metido otra vez la pata

Netscape, cuyo software Navigator, que ciertas fuentes acreditan con 12 millones de usuarios-navegantes, se ha visto de nuevo enzarzada en problemas de defectos de seguridad. Su reciente versión 2.0 del software de navegación es defectuosa. Dos informáticos exteriores a la empresa han descubierto dos anomalías. Los fallos descubiertos permiten que, al visitar una página Web, por una parte se puedan descubrir los nombres de los ficheros residentes en la máquina visitadora y, por otra parte, ésta puede forzar la emisión de un correo electrónico. Dos brechas que pueden parecer de poca importancia, pero que no pueden pasarse por alto cuando se pretende poner en el mercado las herramientas seguras que deben permitir el despegue del comercio electrónico.

RMN a distancia

No todos los laboratorios pueden permitirse un escaner de resonancia magnética nuclear (RMN). En cambio, cualquier investigador dependiente del NIH (National Institute of Health) puede acceder fácilmente al World Wide Web. Por lo tanto, puede utilizar a distancia el NmrScope del departamento de medicina de la universidad de Illinois (en Urbana Champaign), un instrumento de RMN totalmente gestionado por un software (funcionando en una estación RS-600 de IBM) que se presenta como un servidor Web bajo Internet. Una vez obtenida la muestra y reservado un espacio horario, llegado el momento, el investigador sólo tiene que controlar su exploración en tiempo real a través de una página de parámetros y comandos (avanzar, hacer zooms, etc.). Según sus autores, el software puesto a punto en cooperación con el National Center for Supercomputing Applications, podría servir en otros contextos para el control a distancia en tiempo real de microscopios, telescopios, etc.
(htp://bmrl.mod.viva.edv:8080)

Letras bonitas

Los maquetistas refunfuñan: la tipografía no es el fuerte de HTLM, el lenguaje de descripción de página de Web. Esto se debe a la intención inicial del proyecto, que se interesaba sobre todo por la gestión de la estructura de los documentos y tendía a dejar al lector final el control de las pólizas empleadas en la presentación. Pero el éxito de Web, en tanto que soporte de publicación, ha creado nuevas necesi-dades. Por lo tanto, ya no es sorprendente saber que Adobe, Apple y Netscape van a proponer al WWW Consortium una extensión de HTLM que permita controlar el empleo de fuentes Type 1 (Adobe) y True Type (Apple) en una página Web.

Minitel para Internet

Oracle ha presentado finalmente su famoso «Network Computer» (NC), una especie de PC simplificado que se ha diseñado para acceder al Web. Se sabe que el tema divide ampliamente a los observadores. Dotado de un modem de 28.800 bits/s, una memoria de 8 MB, pero desprovisto de disco duro y de unidad de disquete, este aparato podría venderse entre 350 dólares, en el caso de un modelo mínimo sin monitor, y 1.000 dólares. A pesar de que es un minitel caro, tiene unas prestaciones mucho mejores. Larry Ellison insiste en el hecho de que el aparato podría ser vendido junto con un abono, que fuera de tipo teléfono celular, por empresas que ofrecen acceso a Internet y a servicios bajo Web.

eWorld ha muerto

Una víctima más de Internet. Apple, que después de haber considerado dejarse comprar (por Sun con toda seguridad, o por Motorola y Sony posiblemente), proclama, desde la nominación de su nuevo director Gil Amelio, que ya no sueña y que se pondrá rápidamente a resolver algunas cuestiones que habían quedado pendientes. En particular, el fabricante muestra clamorosamente su amor por Internet matando eWorld, el servicio On line, que había lanzado hace dos años. Apple podría haber disfrazado eWorld en un lugar Web, como hizo Microsoft con su MSN. Pero el nuevo jefe ha preferido la claridad. ■

SOLUCIONES A LOS JUEGOS DEL NÚMERO 168

1 A.
Las casillas minadas están en rojo

	1	2	3	4	5	6	7	8
A	1	1	1	1	1	3	2	1
B	2	1	2	1	3	3	2	1
C	2	2	3	1	2	2	3	1
D	1	2	2	2	3	2	2	0
E	1	2	4	2	3	1	2	1
F	1	1	4	3	4	3	2	2
G	1	2	3	4	2	3	3	2
H	0	1	2	2	2	2	1	2

1C.
He aquí una solución (entre otras)

13 2 14
7 19 8 3
18 12 1 15 9
6 17 10 4
11 5 16

1E.

2B. Con 29 movimientos se llega a la posición final. Ésta parece ser la solución óptima.
A-C, B-C,A-B, C-B, C-B, A-C, B-A, B-A, B-C, B-C, A-C, A-C, B-A, C-A, C-A, C-B, C-B, A-C, A-C, B-A, B-A, C-A, C-A, C-B, A-C, A-C, A-B, C-B, C-A.

1 B.
La solución es única salvo una simetría

5
9 4
2 11 7
10 12 1 8
13 3 15 14 6

1D

4	1	6	2	0	4	0
2	2	5	1	0	2	6
4	4	3	3	1	5	4
4	3	3	0	6	5	4
3	2	0	3	1	2	4
2	1	5	2	1	3	1
3	6	6	1	0	6	0
5	5	0	6	5	6	5

MUNDO CIENTIFICO LA RECHERCHE

Para una información adicional

MUNDO CIENTÍFICO

CINDOC (CSIC)

• El Instituto de Información y Documentación en Ciencia y Tecnología (CINDOC) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y **Mundo Científico** ofrece a los lectores interesados información bibliográfica complementaria de determinados artículos publicados en el número de **Mundo Científico.**

• Estas bibliografías (sólo en inglés) se obtienen mediante la exploración de las bases de datos bibliográficas adecuadas accesibles desde el **CINDOC,** y se encuentran a disposición del interesado en el **CINDOC** al precio de 4.000 ptas.

Descuento del 50 % a los suscriptores de **Mundo Científico** (2.000 ptas.).

CUPÓN DE PEDIDO

☐ Los genes de la metamorfosis ....*4.000 ptas*

El **CINDOC** dispone de un servicio de consultas bibliográficas, que proporciona referencias en inglés, en la mayor parte de los casos, sobre una gran variedad de temas, pertenecientes a los campos de las Ciencias aplicadas, la Tecnología, las Ciencias Sociales y las Humanidades, mediante la conexión con diversos distribuidores de Bases de Datos nacionales e internacionales.

CINDOC - Consultas Bibliográficas
Joaquín Costa 22
28002 Madrid
Télex: 22628 CIDMD/E
Teléfono: (91) 563 54 82
Fax: (91) 564 26 44
Adelrey @ cc.csic.es

CONTENTS Nº 169 JUNE 1996

MUNDO CIENTIFICO

• ASESOR CIENTÍFICO
Jaume Josa

• COMITÉ DE REDACCIÓN
Mercé Durfort
Ignacio Bravo

• REDACCIÓN Y COORDINACIÓN
Ofelia Favarón

• DISEÑO GRÁFICO
Mercedes Ruiz-Larrea

LA RECHERCHE

• DIRECTOR GENERAL
Stéphane Khémis

• REDACTOR JEFE
Olivier Postel-Vinay

• COMITÉ CIENTÍFICO
Marc Augé • Claude Cohen-Tannoudji
Vincent Courtillot • Antoine Danchin
Jean-Gabriel Ganascia • Elisabeth Giacobino
• Marc Jeannerod • Jean-Claude Lehmann
Jean-Marie Lehn • Claude Lorius
Luc Montagnier • Alain Omont

ASESORAMIENTO Y TRADUCCIÓN
Diez años después de Chernóbil. Primer balance sanitario; La vida salvaje en Chernóbil; Por un puñado de antiátomos; Nuevas perspectivas sobre el origen del hombre; El encaje de bolillos del control aéreo; Cuando los líquidos desmojan; De la idea...al hecho; René Descartes, científico y filósofo; Juegos: *Joan Pericay*; Júpiter la hora de la verdad; El nacimiento de Ariane 5. Prudencia tecnológica; Una opción económica discutida; Un cohete muy ácido: *Amadeu Monttoto*; Novedades sobre la enfermedad de Chagas; Especie singular; Hacia nuevos antiinflamatorios; Los genes de la metamorfosis: *Jaume Geraldà*.

EDITA
EDITORIAL FONTALBA, S.A.
Pérez Galdós 36
08012 Barcelona (España)
Tel. (93) 415 73 74* Fax (93) 416 18 57

Coordinadora Editorial
Montserrat Mulero

Directora Comercial
Ariadna Hernández

Directora de Publicidad
Marta Bellés

Publicidad
Elena Ruvireta
Príncipe de Asturias 66
08012 Barcelona
Tel. (93) 415 23 22
Fax (93) 238 07 30

SUSCRIPCIONES
Servicio de Atención al Cliente
Pérez Galdós 36
08012 Barcelona (España)
Tel. (93) 415 40 50
Fax (93) 416 00 89
Horario: de 9 a 14 y de 15 a 18 hs
(de lunes a viernes)
Resp. Dpto.: Isabel Albareda

PROMOCIÓN SUSCRIPCIONES
Jefes de zona
Amparo Álvarez Iranzo
Luis A. Griffo

Distribución: **Marco Ibérica, S.A.**
Fotomecánica: FOINSA
Impresión-encuadernación: ROTOCAYFO, S.A.
Sta. Perpetua de Mogoda. Barcelona.
B.10.896-81/©Para la lengua española
Editorial Fontalba, S.A. 1981
Impreso en España-Pinted in Spain

El precio para Canarias, el mismo de la portada incluida sobretasa aérea.

MUNDO CIENTIFICO

avance próximo número:



¿FALTA HIERRO EN EL OCÉANO?
¿Está ligado el ciclo del hierro con el del gas carbónico? Este concepto se basa en un déficit de fitoplancton. De ahí la idea de alimentar el océano con hierro...

DEL BIG BANG A LAS ESTRELLAS.
El nacimiento de la materia. Una historia de actualidad: la reconstitución del escenario de la creación de elementos químicos en el Universo.



UNA ALTERNATIVA AL DIAGNÓSTICO PRENATAL
por Anna Veiga y Montse Boada

VACAS LOCAS: ¿PRIÓN O VIRUS?
por Jacques Froment

EL ENIGMA DE LOS GENES SALTADORES: PATRIMONIO MANIPULABLE
por Christian Biémont y John F. Brookfield

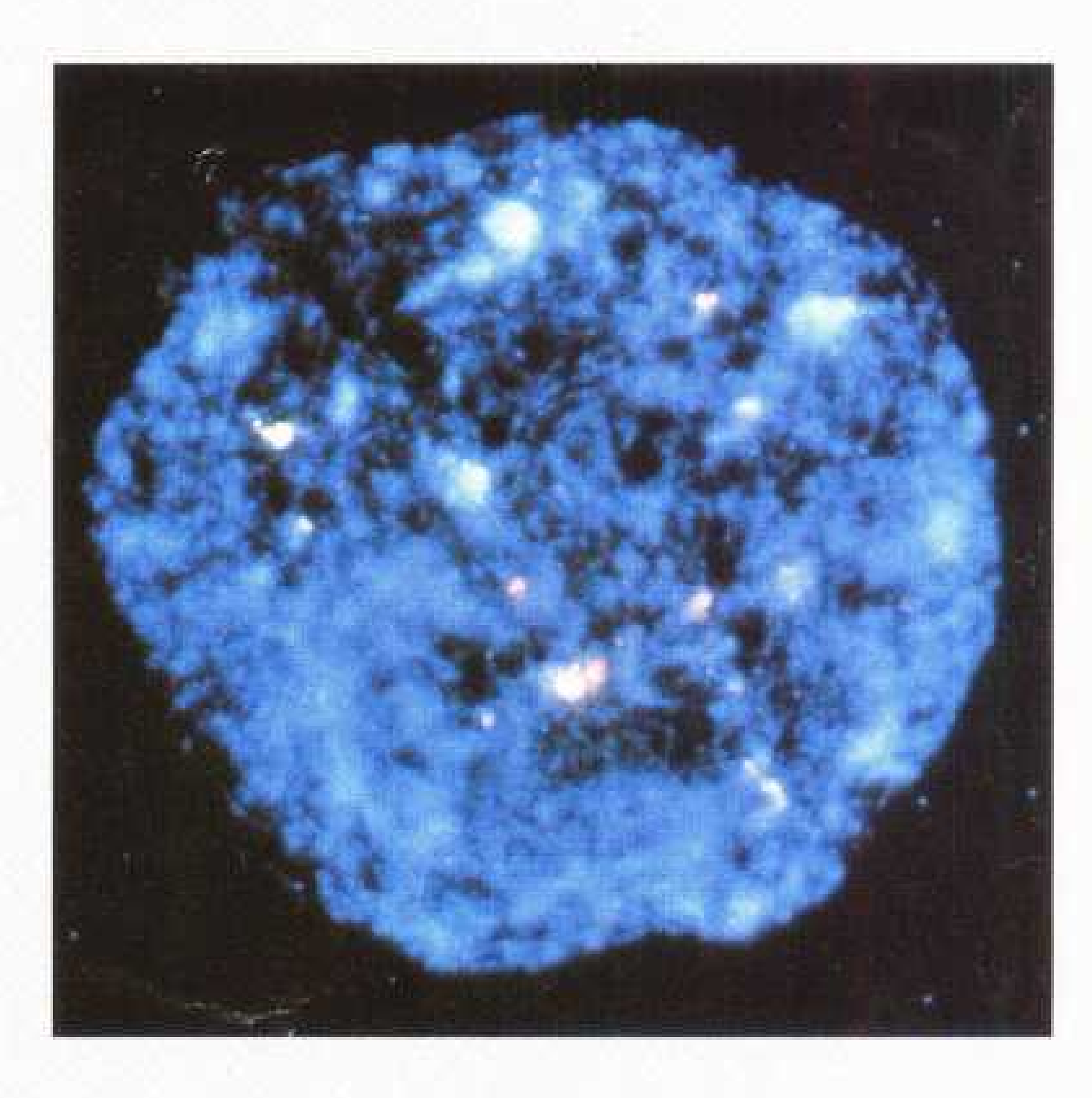
LA INGENIERÍA TISULAR RECONSTRUYE EL SER HUMANO
por Valérie Borde

BIÓLOGOS DE LA CONCIENCIA: EN BUSCA DEL ALMA
por John R. Searle

RAFAEL NÁJERA, INVESTIGADOR DEL SIDA
Entrevista realizada por Ignacio Bravo

DEL BIG BANG A LAS ESTRELLAS: EL ORIGEN DE LA MATERIA
por Sylvie Vauclair

CONVOCATORIAS Y BECAS



DIAGNÓSTICO PREIMPLANTACIONAL.
Las técnicas de diagnóstico preimplantacional (DP) son de aplicación clínica muy reciente y una alternativa al diagnóstico prenatal.



¿ES POSIBLE UNA BIOLOGÍA DE LA CONCIENCIA?
Los trabajos de Francis Crick, Roger Penrose y Gerald Edelman bajo el escalpelo del filósofo norteamericano John R. Searle.



